А. П. Гаршин, С. М. Федотова

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
ТОМ 2
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

2-е издание, исправленное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование»

Москва • Юрайт • 2021

УДК 621.92(075.8)
ББК 34.638.7я73
Г21

Авторы:

Гаршин Анатолий Петрович — доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры базовой подготовки иностранных граждан Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого;

Федотова Светлана Михайловна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. В период подготовки рукописи книги занимала должность заместителя главного технолога абразивного завода «Ильич», г. Санкт-Петербург.

Рецензенты:

Удалов Ю. П. — доктор химических наук, профессор кафедры общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), действительный член Академии инженерных наук имени А. М. Прохорова, заслуженный работник высшей школы;

Радкевич М. М. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Гаршин, А. П.

Г21 Материаловедение. В 3 томах. Том 2. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты : учебник для вузов / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 426 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-02123-3 (т. 2)
ISBN 978-5-534-01949-0

Учебник «Материаловедение» состоит из трех томов. Во втором томе «Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты» представлен систематизированный материал, позволяющий на его основе дать важные практические рекомендации машиностроительным предприятиям по использованию конкретных видов абразивного инструмента и материалов для того или иного вида механической обработки (исходя из заранее определенных эксплуатационных характеристик инструмента).

Издание снабжено рисунками, таблицами, диаграммами.

УДК 621.92(075.8)
ББК 34.638.7я73

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-02123-3 (т. 2)
ISBN 978-5-534-01949-0

© Гаршин А. П., Федотова С. М., 2016
© Гаршин А. П., Федотова С. М., 2016, с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие **5**

Часть II.
АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Глава 1. Характеристика абразивных инструментов **9**
1.1. Виды связок 10
1.2. Твердость 12
1.3. Структура абразивного инструмента 25
1.4. Уравновешенность абразивных кругов 28
1.5. Прочность абразивного инструмента 32
1.6. Типы шлифовального инструмента 36

Глава 2. Производство абразивного инструмента на керамической связке **44**
2.1. Сырьевые материалы для производства керамических связок 45
2.1.1. Полевошпатовое сырье и его заменители 46
2.1.2. Фритты (стекла) и технология их изготовления 61
2.1.3. Огнеупорные глины, каолины и их свойства 71
2.1.4. Волластонит и его заменители 84
2.1.5. Тальк 88
2.1.6. Криолит 88
2.2. Исследование и разработка керамических связок 89
2.2.1. Связки для электрокорундовых материалов 89
2.2.2. Керамические связки для карбида кремния 135
2.2.3. Низкотемпературные керамические связки 172
2.2.4. Влияние качества сырьевых материалов на физико-механические свойства абразивного инструмента 175
2.2.5. Марки связок. Рекомендуемые области их применения 194
2.2.6. Керамическое сырье для производства связок и связки зарубежных фирм 205
2.3. Основы технологического процесса производства керамических связок 210
2.3.1. Сухой способ приготовления керамических связок и оборудование для их производства 210
2.3.2. Мокрый способ приготовления керамических связок 235
2.4. Клеящие вещества формовочных смесей (временные связующие) 242
2.4.1. Характеристика клеящих веществ 243

Глава 3. Технология изготовления абразивных инструментов на керамической связке 264
3.1. Абразивные формовочные смеси 264
3.2. Приготовление полусухих формовочных смесей 276
3.3. Формование абразивных изделий 286
3.3.1. Дозирование формовочных смесей 287
3.3.2. Прессование 291
3.3.3. Прессы и формовочные агрегаты 298
3.3.4. Основные конструктивные особенности пресс-форм для абразивного инструмента 319
3.3.5. Механизмы для выталкивания и съема изделий 322
3.3.6. Техника безопасности и производственная санитария 325
3.4. Термическая обработка абразивных изделий 325
3.4.1. Сушка абразивных изделий 325
3.4.2. Обжиг абразивных изделий 335
3.4.2.1. Методика расчета предельных скоростей нагрева, охлаждения и времени выдержки абразивных заготовок 337
3.4.2.2. Характеристика печей для обжига абразивных изделий ... 356
3.4.2.3. Техника безопасности при обжиге абразивных изделий ... 374
3.5. Поточно-механизированные линии производства абразивных изделий 375
3.6. Механическая обработка абразивных изделий 381
3.7. Виды и причины брака абразивных изделий 391
3.8. Контроль качества, маркировка, хранение и упаковка абразивного инструмента 405
3.9. Анализ оборудования ведущих зарубежных фирм, применяемого для производства абразивного инструмента 409

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный учебник состоит из трех томов. В первом томе «Материаловедение. Абразивные материалы» показаны лучшие достижения в области исследования физико-механических свойств, технологии производства и областей применения абразивных материалов.

Второй и третий тома объединены под названием «Материаловедение. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты» и включают девять глав: второй том — с первой по третью, третий — с четвертой по девятую.

В первой главе приводится описание основных свойств абразивного инструмента, определяемых действующими ГОСТ и дается сравнение отдельных свойств отечественных абразивных инструментов со свойствами инструментов зарубежных фирм.

Глава два посвящена рассмотрению сырьевых материалов для производства керамической связки, исследованию и разработке состава керамических связок и рекомендуемые области их применения. Рассмотрены сухой и мокрый способы приготовления керамических связок и оборудование для их производства. Приводятся составы керамического сырья зарубежных фирм, используемого для производства керамических связок.

В третьей главе описываются технологии изготовления абразивного инструмента на керамической связке и дается детальный анализ оборудования ведущих зарубежных фирм для изготовления инструмента на керамической связке.

В четвертой главе рассмотрены методики и приборы, используемые для определения физико-механических и химических свойств сырьевых материалов, применяемых для изготовления керамической связки, а также описанию свойств самой связки.

В пятой главе дается характеристика абразивного инструмента специального назначения (например, для силового обдирочного шлифования) и сырьевые материалы для его производства, а также приводятся технологические схемы производства, эксплуатационные свойства и рекомендуемые области применения абразивного инструмента специального назначения.

Главы шесть и семь посвящены описанию технологии производства абразивного инструмента на органической связке (бакелитовой и вулканитовой). Рассмотрены процессы производства абразивного инструмента для скоростного обдирочного шлифования и отрезных абразивных кругов на этих связках,

получивших широкое распространение в технике, в том числе и в строительной индустрии.

В главе восемь приводится описание технологических схем производства однослойной и двухслойной абразивной шкурки (ленты) на бумажной и тканевой основах, а также на водостойкой основе. Приводится также характеристика оборудования для производства шкурки, виды изделий из абразивной шкурки и области их применения.

Девятая глава посвящена описанию производства специальных видов абразивного инструмента на органической связке: а) инструмент на связке из поливинилформаля и глифталевых смол; б) специальные сегменты на бакелитовой связке; в) свободно-складчатые круги из ткани.

Таким образом, в втором и третьем томе учебника представлены фактически результаты систематического исследования как отечественных, так и зарубежных авторов и фирм по вопросам технологии получения, изучению свойств и областей применения как самих абразивных материалов, так и изготовляемых из них абразивных инструментов на керамических и органических связках.

Издание содержит систематизированный материал, позволяющий на его основе дать важные практические рекомендации машиностроительным предприятиям по использованию конкретных видов абразивного инструмента и материалов для того или другого вида механической обработки (исходя из заранее определенных эксплуатационных характеристик инструмента). Представленный именно в таком виде учебник может быть использован при обучении студентов вузов по направлению подготовки бакалавров и магистров образовательной области «Металлургия, машиностроение и материалообработка». Может также являться модулем в общем академическом курсе «Материаловедение в машиностроении», а также в отдельных случаях служить и в качестве самого академического курса по изучению абразивных материалов в машиностроении.

В результате изучения материалов учебника студент должен:

знать

- характеристику абразивных инструментов, включая виды связок, твердость, структуру абразивного инструмента, его прочность и типы шлифовальных инструментов (кругов, головок, брусков, сегментов);
- основы технологии производства абразивного инструмента на керамической связке, включая виды сырьевых материалов для подготовки керамических связок;
- виды и марки самих керамических связок, сырье для их приготовления, способы их приготовления и связки зарубежных фирм;
- методики, применяемые для определения физико-механических и химических свойств абразивных инструментов и керамических связок;
- специальные виды абразивного инструмента, включая инструмент для высокоскоростного шлифования, для автомобильной промышленности, для шлифования шариков подшипников и др.;
- основы технологии производства абразивного инструмента на органической связке, включая технологические схемы для обдирочного шлифования

при работе инструмента со скоростью 50 м/с и для чистового шлифования со скоростью 40 м/с, а также технологию изготовления инструмента диаметром 600—800 мм для обдирочного шлифования со скоростью 60—80 м/с и отрезные круги на бакелитовой связке;

- основные особенности производства абразивного инструмента на вулканитовой связке, включая исходные материалы, подготовку сырьевых материалов, оборудование для перемешивания компонентов связки, формование кругов, их вулканизацию и механическую обработку;
- характеристику отрезных и полировочных кругов на вулканитовой связке и производство абразивного инструмента на органической связке за рубежом;
- основы технологии производства абразивного инструмента на гибкой основе, включая технологию производства неводостойкой шлифовальной шкурки на бумажной и на тканевой основе, водостойкой шкурки на бумажной и тканевой основе, двухслойной шкурки на тканевой основе, микронной шлифовальной шкурки, области применения шлифовальной шкурки и различных видов изделий из нее, характеристики шлифовальной шкурки, выпускаемой за рубежом и в странах СНГ;
- основы технологии производства специальных видов абразивного инструмента на органических связующих, включая инструмент на основе связующего вспененного поливинилформаля, бакелитовой связке, шлифовальные сегменты и шевера, бруски для хонингования, инструменты на глифталевой связке, полировальные круги из тканевых материалов и корда;

уметь

- объяснить характеристику абразивного инструмента, включая виды связок, используемых для получения инструмента, твердость, структуру абразивного инструмента, его прочность и типы выпускаемого инструмента (круги, головки, бруски, сегменты);
- предложить технологическую схему производства абразивного инструмента, включая и специальные виды инструмента на керамической связке, используя знания основ технологии производства инструмента на керамической связки;
- предложить технологическую схему получения абразивного инструмента (кругов различного диаметра различного размера) на органической связке для обдирочного шлифования, работающих с различными скоростями от 40 до 80 м/с;
- объяснить основные особенности производства абразивного инструмента на вулканитовой связке, используя материал, изложенный по теме «Производство абразивного инструмента на вулканитовой связке» в главе семь настоящего учебника;
- предложить технологическую схему производства абразивного инструмента на гибкой основе, включая все необходимые технологические операции для всех видов инструмента на гибкой основе на отечественных предприятиях и зарубежных фирмах, используя данные, изложенные в главе восемь настоящего учебника;

- решать конкретные задачи по выбору абразивных материалов и инструментов для конкретного вида механической обработки металлических изделий и изделий из сплавов, керамики, дерева, кожи и др., давать конкретные режимы изготовления абразивных инструментов на керамической и органической связке;

владеть

- знанием основных характеристик абразивных материалов, включая структуру инструмента, виды связок, на которых изготовляется инструмент, твердость инструмента, его типы и прочность;
- основами технологии производства абразивного инструмента на керамической связке, включая сырьевые материалы для производства керамической связки, влияния их качества на физико-механические характеристики инструмента, марки связок и рекомендуемые области их применения, основы технологии производства керамических связок и связки зарубежных фирм и инструмента на их основе, методики, применяемые для определения физико-механических и химических свойств керамичесих связок и инструмента на их основе, а также специальные виды инструмента на керамической связке;
- основами технологии производства абразивного инструмента на органической (бакелитовой) связке, включая исходные материалы, расчет рецептуры, технологические схемы производства кругов для обдирочного шлифования для различных диаметров и скоростей кругов;
- основами технологии абразивного инструмента на органической (вулканитовой) связке, включая оборудование для приготовления связки, подготовку сырьевых материалов и абразивных формовочных смесей, формование абразивных инструментов и их вулканизацию, механическую обработку и контроль качества, технологию получения отрезных и полировальных кругов на вулканитовой связке и производство аналогичного инструмента за рубежом;
- основами технологии абразивного инструмента на гибкой основе, включая технологии производства неводостойкой шлифовальной шкурки на бумажной и тканевой основе, водостойкой шкурки на бумажной и тканевой основе, однослойной на тканевой основе, двухслойной на тканевой основе, двухслойной водостойкой для обработки экранов кинескопов и микронной шлифовальной шкурки, изделия из шлифовальной шкурки, их производство и области применения, а также владеть знанием и возможностью сравнивать выпуск шлифовальной шкурки за рубежом и в странах СНГ;
- основами технологии производства специальных видов абразивного инструмента на органических связующих, включая технологию производства абразивного инструмента на основе связующего вспененного поливинилформаля, высокопористого инструмента на бакелитовой связке, шлифовальных сегментов, абразивных брусков для хонингования, инструментов на глифталевой связке, шлифовальных шеверов на органических связках и полировальных кругов из тканевых материалов и корда;
- знаниями теории и умением решать ряд практических задач по всему курсу «Материаловедение. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты».

ЧАСТЬ II

АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Глава 1

ХАРАКТЕРИСТИКА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Абразивным инструментом называют инструмент, предназначенный для абразивной обработки, у которого в качестве режущих элементов используются шлифовальные зерна, прочно соединенные связующим веществом, называемым связкой.

Чтобы обеспечить обработку поверхности детали, абразивные зерна должны быть прочными и более твердыми, чем обрабатываемый материал, выдерживать достаточную силу прижима к детали и внедрение зерен в обрабатываемую поверхность.

При металлообработке абразивным инструментом необходимо добиваться высоких показателей по точности получения сложных профилей и по качеству поверхности с одновременным снятием относительно большого количества металла в единицу времени. При этом абразивный инструмент должен иметь механическую прочность, чтобы выдержать достаточно высокие нагрузки при его вращении и врезании в обрабатываемый материал.

Промышленность нашей страны в соответствии с существующими ГОСТами, ОСТами и ТУ выпускает большое число типоразмеров абразивных инструментов как по форме и размерам, так и по техническим характеристикам. Поэтому в процессе создания технологических процессов абразивной обработки деталей применение абразивного инструмента практически сводится к выбору его типовых форм и размеров, а также к определению оптимальных характеристик в соответствии с условиями эксплуатации.

К основным характеристикам абразивного инструмента относятся:

марка абразивного инструмента и зернистость абразива, из которого изготовлен инструмент;

марка связки, удерживающая зерна абразивного материала в инструменте в процессе обработки деталей;

твердость инструмента, характеризующая прочность удержания абразивных зерен в связке;

структура, определяющая объем, занимаемый абразивным зерном в инструменте;

форма и размеры;

уравновешенность инструмента.

1.1. Виды связок

В производстве абразивного инструмента применяют два вида связок: неорганические (минерального происхождения) и органические. Среди неорганических связок различают керамические (обозначаются буквой "К" в России и буквой "V" — за рубежом), магнезиальные (обозначаются "М" в России и "MG" — за рубежом) и силикатовую связки [1].

К органическим связкам относятся бакелитовая (обозначается буквой "Б" в России, за рубежом — "В"), вулканитовая (обозначается в России буквой "В", за рубежом — "R"), глифталевая ("BE"), эпоксидная, поливинилформалевая и полиэфирная связки (не имеют специального обозначения).

Керамическая связка представляет собой, как правило, многокомпонентные смеси, составленные из взятых в определенных пропорциях измельченных сырьевых материалов: огнеупорных глин или каолина, полевого шпата, стекол (фритт) различного химического состава, талька, криолита и ряда других материалов.

Керамические связки благодаря своим свойствам — водостойкости, химической стойкости, жесткости и сравнительно высокой прочности на разрыв — широко распространены и применяются для изготовления всех типов абразивного инструмента. Они обеспечивают достаточно высокую производительность инструмента, необходимую пористость, хорошо сохраняют его профиль и хорошо отводят тепло. Недостатком керамических связок является их хрупкость, которая делает абразивные инструменты чувствительными к ударной нагрузке. На керамических связках изготавливается абразивный инструмент для работы при окружных скоростях от 35 до 100–120 м/с.

Магнезиальная связка представляет собой магнезиальный цемент, образующийся на воздухе при смешивании каустического магнезита и раствора хлорида магния. Инструмент на магнезиальной связке имеет низкую механическую прочность; из-за высокой способности самозатачиваться шлифование кругами на магнезиальной связке проходит с малой теплоотдачей. Магнезиальная связка гигроскопична, поэтому абразивный инструмент на ее основе должен храниться в сухом помещении. На магнезиальной связке изготавливается абразивный инструмент для работы при окружных скоростях от 20 до 30 м/с.

Силикатовая связка, приготовляемая из смеси жидкого стекла с различными наполнителями (оксида цинка, мела, глины и др.), обладает достаточной прочностью, однако плохо смачивает абразивные зерна и слабо соединяется с их поверхностью. По этой причине круги на силикатовой связке имеют повышенный износ, хорошую самозатачиваемость и применяются в тех случаях, когда необходимо вести обработку при высокой температуре в зоне резания.

Бакелитовая связка состоит из жидких и порошкообразных фенолформальдегидных смол с наполнителями неорганической природы (криолит, пирит, алебастр и др.). Абразивный инструмент на бакелитовой связке обладает высокой прочностью на сжатие и ударной прочностью, превосходя по этим показателям инструмент на керамической связке. Высокая прочность бакелитовой связки позволяет абразивному инструменту работать при больших нагрузках и высоких скоростях резания (при армировании — до 100 м/с). Такие абразивные круги применяются для обдирочных и отрезных операций, при шлифовании с большими нагрузками и высоким съемом металла. Бакелитовая связка оказывает также полирующее действие, что повышает качество обработки изделий. К недостаткам бакелитовой связки следует отнести ее невысокую стойкость к щелочным охлаждающим жидкостям (нежелательно применение для охлаждения растворов, содержащих щелочи более 1,5 %), низкую теплостойкость (происходит деструкция связки) при температуре 400–700 °C и проявление "ползучести" (увеличение объема под действием постоянной нагрузки).

Вулканитовая связка состоит в основном из синтетического каучука с различными добавками (сера, каптакс, тиурам и др.), а также с минеральными и органическими наполнителями, которые влияют на физико-механические и эксплуатационные свойства абразивных инструментов. На вулканитовой связке изготовляют жесткие и гибкие круги. Жесткие круги на вулканитовой связке обладают большей прочностью и упругостью по сравнению с бакелитовыми кругами и поэтому применяются для изготовления тонких кругов (десятые доли миллиметра при диаметре 150–200 мм), используемых при высоких окружных скоростях шлифования (до 50 м/с).

Вулканитовая связка обладает большим полирующим действием, чем бакелитовая связка, и обеспечивает высокий класс шероховатости обработки изделий. К недостаткам вулканитовой связки следует отнести ее низкую теплостойкость и высокую плотность, приводящую к размягчению связки с повышением температуры в зоне обработки изделия, вызывающей заволакивание пор и засаливание круга.

Глифталевая связка — продукт взаимодействия глицерина с фталевым ангидридом. Низкая теплостойкость (120 °C), невысокая твердость позволяют применять круги на глифталевой связке только для процессов полирования при рабочей скорости не выше 40 м/с.

Поливинилформалевая связка — синтетический полимер,

$$\left(\left[\begin{array}{l}-CH-CH_2-CH-CH_2-\\ \quad | \qquad\quad | \qquad\ \ |\\ \quad O - CH_2-O\end{array}\right]_n\right)$$

являющийся продуктом взаимодействия поливинилового спирта с формальдегидом — вспененный поливинилформаль. Другое название кругов на основе этой связки — поропластовые. Используются для полирования с получением шероховатости поверхности 0,63–1,0 мкм.

Эпоксидная связка — синтетическая смола, молекула которой содержит эпоксидные $\left(\begin{array}{c}>C-C<\\ \diagdown\ \diagup\\ O\end{array}\right)$ или глицериновые $\left(\begin{array}{c}-CH_2-CH-CH_2\\ \diagdown\ \diagup\\ O\end{array}\right)$ группы.

Полиэфирная связка — насыщенные растворы полиэфиров (R–O–CO–R) с малеиновой кислотой (HOOCHC=CHCOOH). Эти связки используются в основном для изготовления галтовочных тел, абразивных изделий, используемых во вращающихся барабанах и вибрационных контейнерах для очистки поверхностей и снятия заусенцев деталей малого размера.

1.2. Твердость

Под твердостью абразивного инструмента понимается сопротивляемость вырыванию абразивных зерен из поверхностного слоя инструмента под действием внешних усилий.

Твердостью пытаются оценить сопротивление поверхности абразивного инструмента усилиям шлифования, стремящимся ее разрушить. В случае механического воздействия показателем твердости инструмента считают его разрушение при определенных усилиях.

Твердость инструмента в значительной степени определяет производительность процесса обработки и качество обрабатываемой детали; она является комплексным показателем и изменяется в зависимости от соотношения количества зерен, связки и пор в конкретном инструменте.

На твердость абразивного инструмента влияют как содержание связки, вид связки, размер абразивных зерен, так и размер пор. При постоянных количествах связки и зернистости шлифовального материала твердость инструмента можно изменять за счет уплотнения. При одинаковой твердости можно получить круги с разной пористостью за счет изменения содержания зерна в единице объема, т. е. структуры инструмента.

Получение заданной твердости обеспечивается технологическими параметрами абразивного инструмента. Твердость — один из основных параметров характеристики абразивного инструмента, необходимых при выборе инструмента для конкретной операции абразивной обработки, и она должна быть оптимальной для определенной операции, обеспечивающей возможность затупившимся зернам вырываться из связки и тем самым вскрывать новые абразивные зерна, т. е. способствовать самозатачиванию абразивного инструмента. При высокой степени твердости затупившиеся зерна не будут своевременно вырываться из инструмента, что приведет к появлению прижогов. Следовательно, от твердости абразивного инструмента зависят качество обрабатываемой поверхности, частота правки шлифовальных кругов, производительность обработки.

Твердость абразивных инструментов относится к группе физических величин, с помощью которых определены лишь отношения типа "больше-меньше" ("тверже-мягче"). Существование подобных отношений вытекает из результатов теоретических и экспериментальных исследований и определяется соотношением количества шлифовального материала и связки, содержащихся в абразивном инструменте. В соответствии с действующими в России стандартами установлена единая шкала твердости абразивного инструмента (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Обозначения степеней твердости и глубины лунок в зависимости от марки абразивных материалов и их зернистостей

Степень твердости	Материал инструмента	Глубина лунок при давлении воздуха в камере прибора 0,05 МПа для зернистостей по ГОСТ 3647–80						
		50	40, 32	25, 16	12, 8	6, M40	M28, M20	M 14 и <
M1	C	< 3,8–3,2	< 4,5–3,9	< 6,7–5,8	< 7,0–6,1	< 6,2–5,2	< 4,8–4,2	
	A	< 3,8–3,2	< 4,5–3,9	< 6,7–5,8	< 6,5–5,5	< 6,0–5,1	< 4,7–4,0	< 2,8–2,2
M2	C	< 3,2–2,6	< 3,9–3,3	< 5,8–4,9	< 6,1–5,2	< 5,2–4,6	< 4,2–3,6	< 4,2–3,6
	A	< 3,2–2,6	< 3,9–3,3	< 5,8–4,9	< 5,5–4,7	< 5,1–4,4	< 4,0–3,4	< 2,2–1,8
M3	C	< 2,6–2,1	< 3,3–2,8	< 4,9–4,0	< 5,2–4,2	< 4,6–3,9	< 3,6–3,0	< 3,6–3,0
	A	< 2,6–2,1	< 3,3–2,8	< 4,9–4,0	< 4,7–4,0	< 4,4–3,7	< 3,4–2,8	< 1,8–1,4
Глубина лунок при давлении воздуха в камере прибора 0,15 МПа (ГОСТ 3647–80)								
C1	C	< 3,4–2,9	< 4,2–3,6	< 4,9–4,3	< 5,1–4,7	< 5,0–4,6	< 4,5–4,2	< 4,5–4,2
	A	< 3,4–2,9	< 4,2–3,6	< 4,9–4,3	< 4,7–4,3	< 4,6–4,1	< 4,1–3,6	< 3,8–3,4
C2	C	< 2,9–2,4	< 3,6–3,1	< 4,3–3,7	< 4,7–4,4	< 4,6–4,2	< 4,2–3,9	< 4,2–3,9
	A	< 2,9–2,4	< 3,6–3,1	< 4,3–3,7	< 4,3–3,9	< 4,1–3,7	< 3,6–3,2	< 3,4–3,1
CT1	C	< 2,4–2,0	< 3,1–2,6	< 3,7–3,2	< 4,4–4,1	< 4,2–3,9	< 3,9–3,6	< 3,9–3,6
	A	< 2,4–2,0	< 3,1–2,6	< 3,7–3,2	< 3,9–3,5	< 3,7–3,3	< 3,2–2,9	< 3,1–2,8

Примечание. А — электрокорундовые материалы, С — карбид кремния.

В соответствии с ГОСТ 18118–79 приняты следующие обозначения твердости абразивного инструмента:

ВМ (ВМ1, ВМ2) — весьма мягкий;
М (М1, М2, М3) — мягкий;
СМ (СМ1, СМ2) — среднемягкий;
С (С1, С2) — средний;
СТ (СТ1, СТ2, СТ3) — среднетвердый;
Т (Т1, Т2) — твердый;
ВТ (ВТ1, ВТ2) — весьма твердый;
ЧТ (ЧТ1, ЧТ2) — чрезвычайно твердый.

В градации степеней твердости цифры 1, 2, 3 характеризуют твердость в порядке возрастания.

За рубежом для обозначения степеней твердости применяются буквы латинского алфавита (табл. 1.2 и 1.3).

Как видно из табл. 1.3, в отличие от российских ГОСТов зарубежные фирмы разделяют абразивный инструмент по степени твердости на более широкие диапазоны. Так, в России применяются 16 степеней твердости, по американскому стандарту — 24, в Германии — 23, в Швейцарии — 25, в Японии — 21 и т. д. При этом обозначения твердости отличаются даже внутри одного подразделения. Так, например, в подразделении "очень мягкие круги" у фирмы Norton (США) семь степеней, у фирмы FAO (Германия) — четыре степени, у фирмы Noritake (Япония) — три степени и т. д.

Для контроля твердости абразивных инструментов используются механические и акустические методы.

Таблица 1.2

Ориентировочные обозначения степеней твердости отечественных и зарубежных инструментов

Россия		Зарубежные фирмы	Россия		Зарубежные фирмы
Весьма мягкий	ВМ1	F	Среднетвердый	СТ1	P
	ВМ2	G		СТ2	Q
Мягкий	М1	H		СТ3	R
	М2	I	Твердый	Т1	S
	М3	J		Т2	T
Среднемягкий	СМ1	K	Весьма твердый	ВТ	U, V, W
	СМ2	L	Чрезвычайно твердый	ЧТ	X, Y, Z
Средний	С	M			
	С2	N			

Таблица 1.3

Принятые обозначения степеней твердости абразивных инструментов в зарубежных фирмах [2]

Страна, фирма	Степень твердости абразивных инструментов						
	Чрезвычайно мягкие	Очень мягкие	Мягкие	Средние	Твердые	Очень твердые	Чрезвычайно твердые
США стандарт ANSI B74 13-1977							
NORTON	-	A, B, C, D, E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, Y, W, Z	–
CARBORUNDUM	–	A, B, C, D, E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, Y, W, Z	–
BAY STATE	–	C, D, E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, F	T, U, Y, W, Z	–
Германия (стандарт ФРГ DIN 69 100)	–	D, E, F, G	H, I, Jot, K	L, M, N, O	P, Qn, R, S	T, U, V, W, X, Y, Z	–
FAG Kugelfischer	–	C, D, E, F	H, I, Jot	K, L, M, N	N, O, P, Q	T, U, V, W	–
ATLANTIC DRESSER	A, B, C, D	E, F, G	H, I, Jot, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, Y, W	X, Y, Z
NAXOS-UNION, FELDMUHLE	–	E, F, G	H, I, Jot, K	L, M, N, O	P, Qn, R, S	T, U, Y, W	X, Y, Z
DISKUS	A, B, C, D	E, F, G	H, I, Jot, K	L, M, N, O	P, Qn, R, S	T, U, Y, W	X, Y, Z
Англия, UNI	–	E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, Y, W, Z	–
Австрия, TYROLIT	—	D, E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, V, W	X, Y, Z
Швейцария, WINTERTHUR	A, B, C, D	E, F	G, H, J	K, L, M	N, O, P, Q	R, S, T	U, V, W, X, Y, Z

Окончание табл. 1.3

Страна, фирма	Степень твердости абразивных инструментов						
	Чрезвычайно мягкие	Очень мягкие	Мягкие	Средние	Твердые	Очень твердые	Чрезвычайно твердые
Италия							
MOLEMAB	–	E, F, G, H	I, J, K, L	M, N, O	P, Q, R	S, T, U, V	–
SAIPA	–	–	G, H, I,J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, V, Z	–
FGM	–	-	G, H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, V, Z	–
Швеция, SLIP NAXOS	–	C, D, E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Qu, R, S	T, U, W, Z	–
Япония							
NORITAKE	–	E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, W, X, Y, Z	–
NITTO	–	E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, Q, R, S	T, U, W, X, Y, Z	–
Индия, GRINDWELL NORTON LTD	–	E, F, G	H, I, J	K, L, M, N, O	P, Q, R, S, T	U, V, W, X, Y, Z	–
Югославия, SWATI	–	E, F, G	H, I, J, K	L, M, N, O	P, R, S	T, U, W, Z	–
Чехия, CARBORUNDUM ELECTRITE	мягкие H, I, J	средне-мягкие K, L	средние M, N	средне-твердые (O, P, Q)	R, S	T, U	V, W
Китай	сверх-мягкие D, E, F	мягкие G, H, J	средне-мягкие K, L	M, N	P, Q, R	S, T	Y, V

Механические методы состоят в том, что с помощью того или иного механического воздействия производится разрушение небольшого участка поверхности абразивного инструмента. Степени твердости инструмента соответствуют (в зависимости от вида разрушения и типа инструмента) либо геометрические параметры разрушенного участка поверхности, либо параметры его сопротивления разрушению при прочих равных условиях. В качестве механических воздействий применяются сверление и долбление участка поверхности инструмента, откалывание от нее куска материала, обкатывание роликом, качание в материале круга остроконечного штифта, обработка участка струей песка под давлением, выдавливание в поверхности инструмента углубления шариком или конусом, царапанье поверхности алмазным конусом и др. Для контроля твердости абразивного инструмента в отечественной промышленности широко применяются в основном следующие три механических метода: пескоструйный (ГОСТ 18118–72), метод вдавливания шарика (ГОСТ 19202–73), метод вдавливания конуса (ГОСТ 21323–75).

Измерению твердости пескоструйным методом подвергаются абразивные инструменты из электрокорунда и карбида кремния на керамической, бакели-

товой и глифталевой связках зернистостью 50 и менее (за исключением шлифовальных брусков зернистостью 12 и менее, а также шлифовальных кругов высотой менее 8 мм и зернистостью 12 и менее).

Контроль твердости *пескоструйным методом* основан на измерении глубины лунки, образующейся на поверхности абразивного инструмента, при разрушении ее струей кварцевого песка, выбрасываемой в виде порции под определенным давлением из сопла пескоструйного прибора.

Для контроля твердости применяются две модели приборов — 909 (для определения твердости абразивных кругов диаметром от 400 до 1400 мм) и 910 (для кругов диаметром до 400 мм) (рис. 1.1).

Главным узлом пескоструйного твердомера является измерительная головка (рис. 1.2).

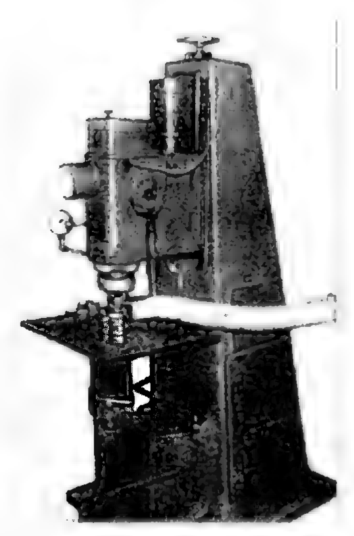


Рис. 1.1. Пескоструйный прибор для определения твердости абразивных инструментов (общий вид)

Метод вдавливания шарика распространяется на шлифовальные бруски всех форм и размеров, шлифовальные круги высотой не более 8 мм, зернистостью 12 и менее, на керамической и бакелитовой связках. При использовании метода вдавливания шарика измеряется глубина лунки, образующейся от вдавливания в тело инструмента стального шарика определенного диаметра под действием постоянной нагрузки.

Определение твердости абразивных инструментов методом вдавливания шарика производится на приборе типа "Роквелла" ТК-2 и ТК-2М с рычажным нагружением и механическим приводом (рис. 1.3 и 1.4) и оснащенных различными формами столов (рис. 1.5) под действием двух последовательно прилагаемых к нему нагрузок: предварительной нагрузки P_0 и общей нагрузки $P = P_0 + P_1$, где P_1 — основная нагрузка. По разности глубины h проникновения шарика в контролируемую поверхность под действием общей и предварительной нагрузок определяют степень твердости контролируемого инструмента (рис. 1.6).

Метод вдавливания конусом аналогичен методу вдавливания шарика, производится на приборе "Роквелла" и отличается тем, что в качестве рабочего наконечника применяется конус с углом при вершине 60°, изготовленный из твердого сплава ВК6. Схема измерения твердости шлифовальных кругов прибором ТКВ представлена на рис. 1.7.

Неразрушающий метод контроля твердости. К неразрушающему методу определения физико-механических свойств инструмента (твердости) относится акустический метод (ГОСТ 25961–83) [3, 4]. Настоящий ГОСТ распространяется на шлифовальные, обдирочные и отрезные круги, в том числе с упрочняющими элементами, абразивные бруски, шлифовальные сегменты

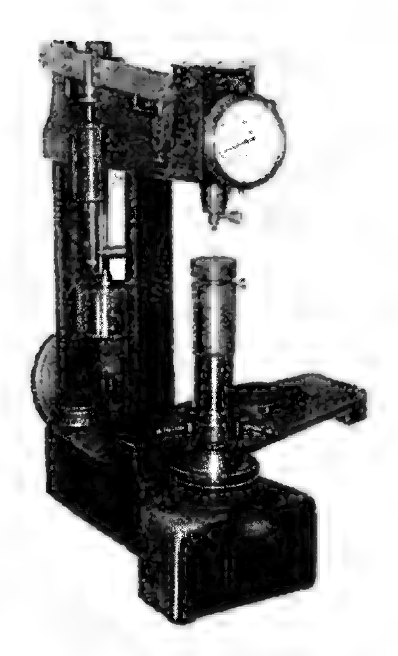


Рис. 1.3. Общий вид прибора типа "Роквелла" для определения твердости методом вдавливания шарика

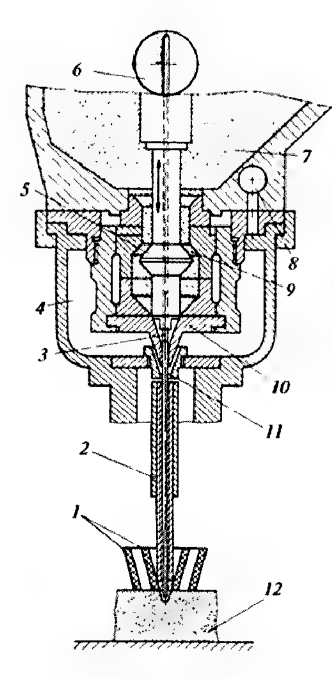


Рис. 1.2. Конструкция измерительной головки пескоструйного прибора:

1 — уплотнительные манжеты; *2* — сопло; *3* — измерительная игла; *4* — воздушная камера; *5* — клапан; *6* — шкала; *7* — резервуар; *8* — патрубок; *9* — песочная камера; *10* — седло; *11* — коническое сопло; *12* — абразивный инструмент

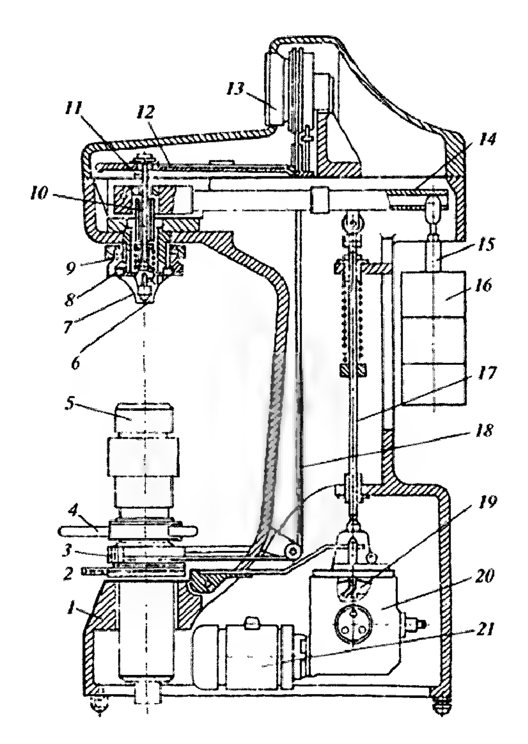


Рис. 1.4. Конструкция прибора типа ТК-2 (разрез):

1 — литой корпус; *2* — механизм подъема; *3* — барабан; *4* — маховик; *5* — сменный стол; *6* — ограничитель; *7* — наконечник; *8* — направляющая втулка; *9* — пружина; *10* — шпиндель; *11* — плавающая подвеска; *12* — измерительный рычаг; *13* — индикатор; *14* — рычаг; *15* — подвеска; *16* — груз; *17* — шток; *18* — тросик; *19* — рабочий кулачок; *20* — червячный редуктор; *21* — электродвигатель

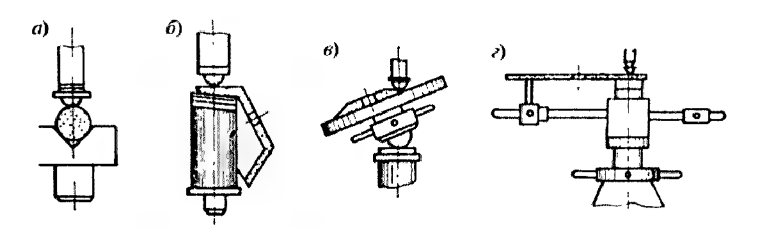


Рис. 1.5. Форма столов для испытания твердости абразивных изделий:
а — круглые бруски; *б* — чашечные круги конической формы; *в* — тарелки конические; *г* — круги прямого профиля диаметром свыше 200 мм

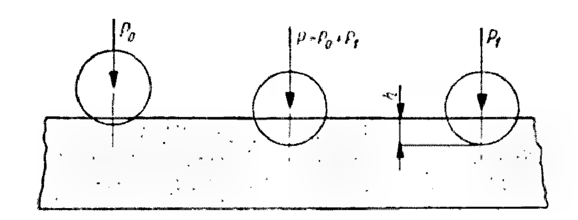


Рис. 1.6. Положение шарика в зависимости от нагрузки при измерении твердости на приборе типа "Роквелла"

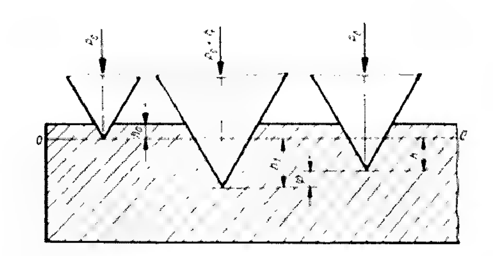


Рис. 1.7. Схема измерения твердости шлифовальных кругов прибором ТКВ

из электрокорундовых и карбидокремниевых шлифовальных материалов любой зернистости на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках.

Стандарт устанавливает метод определения приведенной скорости распространения акустических волн C_l, по значению которой определяется звуковой индекс (ЗИ) инструмента.

Определение приведенной скорости распространения акустических волн C_l производится по результатам измерения частот собственных колебаний (ЧСК) изделий.

Сущность акустического метода заключается в измерении частот собственных колебаний круга с последующим переводом полученных результатов в параметр C_l, характеризующий физико-механические свойства изделия, которые не зависят от его формы и размеров. Параметр C_l связан с модулем упругости E и плотностью ρ соотношением $C_l = \sqrt{E/\rho}$. Этот параметр имеет физический смысл и размерность скорости распространения упругих колебаний в материале изделия. Параметр C_l, с одной стороны, зависит, от рецептуры абразивного изделия и технологии его изготовления и, с другой стороны, связан с эксплуатационными показателями инструмента. Значения C_l от 1800 до 7500 м/с охватывают практически все виды абразивного инструмента на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках и могут определяться по единой методике независимо от абразивного материала, его зернистости, структуры круга, вида связки.

Для удобства пользования указанный диапазон C_l разбит на 29 интервалов с шагом 200 м/с так называемых звуковых индексов (ЗИ), например: ЗИ43 — 4200–4400, ЗИ45 — 4400–4600, ЗИ47 — 4600–4800 и т. д.

Неразрушающий метод контроля твердости абразивного инструмента проводят на приборе "Звук", основные технические характеристики которого приведены в табл. 1.4, а общий вид приборов ("Звук 203М" и "Звук 130") — на рис. 1.8 и 1.9.

Таблица 1.4

Основные характеристики приборов типа "Звук"

Метод возбуждения колебаний	Тип прибора	Частотный диапазон, кГц	Под-диапазоны	Диапазон измеряемых частот, кГц	Погрешность измерения частоты, не более, %
Метод свободных колебаний	Звук 203М	от 0,022 до 17,441	0	От 0,022 до 0,040	±2,5 (до 100 Гц)
			1	От 0,033 до 0,060	
			2	От 0,050 до 0,090	
			3	От 0,075 до 0,134	
			4	От 0,112 до 0,202	
			5	От 0,168 до 0,302	± 1 (свыше 100 Гц)
			6	От 0,252 до 0,454	
			7	От 0,378 до 0,681	
			8	От 0,567 до 1,021	
			9	От 0,851 до 1,531	
			10	От 1,276 до 2,297	
			11	От 1,914 до 3,445	
			12	От 2,871 до 5,168	
			13	От 4,307 до 7,752	
			14	От 6,460 до 11,628	
			15	От 9,690 до 17,441	
	Звук 202-01 (Звук 202), Звук 203	От 0,90 до 11,00	1	От 0,90 до 1,80	±2
			2	От 1,40 до 2,80	
			3	От 2,22 до 4,44	
			4	От 3,50 до 7,00	
			5	От 5,50 до 11,00	

Метод возбуждения колебаний	Тип прибора	Частотный диапазон, кГц	Под-диапазоны	Диапазон измеряемых частот, кГц	Погрешность измерения частоты, не более, %
Метод свободных колебаний	Звук 202-02, Звук 203-02	От 0,30 до 4,44	1	От 0,30 до 0,60	±0,2
			2	От 0,50 до 1,00	
			3	От 0,90 до 1,80	
			4	От 1,40 до 2,80	
			5	От 2,22 до 4,44	
Метод вынужденных колебаний	Звук 130	От 0,5 до 500,0	Может быть представлен любым поддиапазоном с заданными границами частот		± 3
	Звук 110М	От 0,5 до 500,0	1	От 0,50 до 2,50	
			2	От 1,50 до 15,0	
			3	От 12,00 до 120,0	
			4	От 80,00 до 500,0	
	Звук 107-01 (Звук 107)	От 5,0 до 500,0	А	От 5,00 до 19,00	
			Б	От 14,00 до 50,00	
			А · 10	От 50,00 до 190,00	
			Б · 10	От 140,00 до 500,0	
	Звук 107-02 Звук 107-03	От 0,5 до 50,0	А	От 5,00 до 19,00	
			Б	От 14,00 до 50,00	
			А : 10	От 0,50 до 1,90	
			Б : 10	От 1,40 до 5,00	



Рис. 1.8. Прибор "Звук 203М" (общий вид)

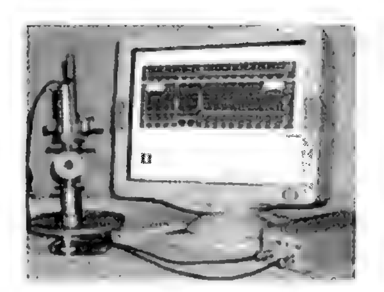


Рис. 1.9. Прибор "Звук 130" (общий вид)

Ассортимент абразивного инструмента и применяемые приборы для определения звукового индекса (ЗИ) приведены в табл. 1.5.

Проверка твердости акустическим методом контроля в отличие от механических методов, основанных на разрушении поверхности инструмента, является физическим методом. В связи с этим степени твердости, определенные двумя методами, могут не совпадать.

Ориентировочное соответствие между звуковым индексом (ЗИ) по ГОСТ 25961—83 и, например, твердостью абразивного инструмента на керамической связке по ГОСТ 18118—79 представлено в табл. 1.6.

Таблица 1.5

Ассортимент абразивного инструмента и приборы, применяемые для определения звукового индекса

Вид и тип контролируемого абразивного инструмента	Тип и модификация приборов
Шлифовальные круги типа 1 и 5 наружным диаметром от 3 до 100 мм и круги из эльбора типа А8	Звук 130, Звук 110М, Звук 107-01 (Звук 107)
Шлифовальные круги типа 1, 3, 5 наружным диаметром от 100 до 250 мм, круги типа 41, 42, в том числе с упрочняющими элементами	Звук 130, Звук 110М, Звук 107-02, Звук 107-03
Шлифовальные и обдирочные круги типа 1, 3, 5 наружным диаметром свыше 250 мм, круги типа 6, 11, 12 на керамических связках, шлифовальные сегменты типа 3С, 9С	Звук 203-М, Звук 203, Звук 202-02
Шлифовальные круги типа 2 на керамической и бакелитовой связках, шлифовальные и обдирочные круги типа 1 и 36 наружным диаметром свыше 250 мм типа 6, 11, 12; шлифовальные сегменты типа 3С, 9С на бакелитовой и вулканитовой связках	Звук 130, Звук 110М, Звук 107 (Звук 107-01 или Звук 107-02)
Абразивные бруски типа БП, $БК_в$ и шлифовальные сегменты типа СП, 1С, 2С, 4С, 5С, 6С, 11С длиной до 250 мм	Звук-130, Звук 110М, Звук 107 (Звук 107-01 или Звук 107-02)

Таблица 1.6

Ориентировочные соотношения твердости, определенные двумя методами

Степень твердости	Значения ЗИ абразивных инструментов из различных материалов			
	Белый, нормальный и легированные электрокорунды зернистостью свыше 6	Зеленый карбид кремния зернистостью свыше 6	Белый, нормальный и легированный электрокорунды и зеленый карбид кремния зернистостью	
			6–М40	менее М40
М1	35; 37	–	33; 35	33; 35
М2	39; 41	47; 49	37; 39	35; 37
М3	41; 43	51; 53	41; 43	39; 41
СМ1	45; 47	55	43; 45	41; 43
СМ2	49	57	45; 47	43; 45
С1	51	59	49	45; 47
С2	53	59	49; 51	47; 49
СТ1	55	61	51; 53	49
СТ2	57	61	53	51
СТ3	59	63	55	53
Т1	61	63	55; 57	–
Т2	61	–	57	–
ВТ	63	–	–	–

С 1 января 2008 года вводится ГОСТ Р 52587–2006, который объединяет все методы определения твердости: пескоструйный, метод вдавливания шарика и метод вдавливания конусом. При этом твердость абразивного инструмента следует обозначать: F, G — весьма мягкий; H, I, J — мягкий; K, L — среднемягкий; M, N — средний; O, P, Q — среднетвердый; R, S — твердый; T, U — весьма твердый; V, W, X, Y, Z — чрезвычайно твердый (буквы характеризуют возрастание твердости внутри диапазона). Такое же обозначение твердости вводится и в ГОСТ Р 52710–2007 "Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн".

Акустический метод контроля твердости находит достаточно широкое распространение в зарубежных фирмах. В основном используются приборы типа Crindo Sonic, выпускаемые бельгийской фирмой J. W. Lemmens W. V., которые измеряют частоту собственных колебаний, возбуждаемых в изделии ударом, аналогично измерениям на приборе "Звук 203". Контроль производится в основном вручную с использованием различного рода приспособлений для установки изделия при контроле, в отдельных случаях — с использованием механизации подачи круга на измерительную позицию и с широким применением компьютерной техники.

Сравнительные испытания на фирмах приборов "Звук 203М" и Crindo Sonic показали, что использование прибора "Звук 203М" позволяет производить контроль аналогично приборам Crindo Sonic.

Приборы типа "Звук 203М", "Звук 130", "Звук 110М" поставляются на экспорт и эксплуатируются фирмами Германии, Италии, Чехии, Индии, Швейцарии и др.

Твердость инструмента в значительной степени определяет производительность процесса обработки и качество обрабатываемой детали [5, 6].

Абразивные зерна по мере их затупления должны обновляться путем скалывания и выкрашивания частиц. При слишком твердом круге связка продолжает удерживать затупившиеся и потерявшие режущую способность зерна. При этом на работу расходуется большая мощность, изделия нагреваются (возможно их коробление), на поверхности появляются следы дробления, риски, прижоги и другие дефекты.

При слишком мягком круге зерна, не утратившие свою режущую способность, выкрашиваются, круг теряет правильную форму, увеличивается его износ — в результате трудно получить деталь необходимых размеров и форм. В процессе обработки появляется вибрация, необходима более частая правка круга. Таким образом, в обоих случаях снижается интенсивность съема материала, повышается шероховатость поверхности обрабатываемого изделия.

На выбор твердости абразивного инструмента влияют следующие факторы: физико-механические свойства шлифуемого материала, значение площади контакта между инструментом и изделием, режим работы, мощность электродвигателя, состояние станка.

При выборе твердости круга необходимо руководствоваться следующими положениями:

твердые материалы скорее истирают абразивные зерна, затупляют их. Удаление затупившихся зерен скорее происходит в сравнительно мягких кругах. Поэтому для обработки твердых материалов следует применять мягкие абразивные инструменты, а для обработки материалов невысокой твердости — более твердые. Исключение составляют медь, алюминий, свинец, нержавеющая и жаропрочная сталь, которые шлифуют мягким инструментом. При обработке вязких материалов отходы шлифования заполняют поры круга, и он становится непригодным для работы. В этом случае необходима правка круга, хотя абразивные зерна могут быть еще очень острыми;

с увеличением площади контакта между кругом и изделием давление на единицу круга уменьшается, и следовательно, обновление затупившихся зерен затрудняется. В этом случае следует использовать более мягкий инструмент;

чем больше окружная скорость круга при прочих неизменных условиях, тем более мягкий инструмент следует применять. При интенсивных режимах

работы — при большой скорости изделия и поперечной подаче — применяются более твердые круги;

для предварительных операций применяются более твердые инструменты, чем для чистовых;

при шлифовании всухую следует использовать более мягкие круги, чем при работе с охлаждением;

при шлифовании неровных, прерывистых поверхностей применяются более твердые инструменты, чем при шлифовании ровных поверхностей;

на автоматических станках устойчивых и жестких конструкций со спокойным ходом шпинделя применяются более мягкие круги, чем на станках с ручной подачей;

мелкозернистые инструменты должны быть относительно меньшей твердости, а крупнозернистые — большей;

при заточке лезвий закаленных инструментов, при шлифовании и заточке пластинок из твердых сплавов, при обработке поверхностей изделий, плохо отводящих тепло, тонких, с отверстиями (типа труб) и т. п. применяют мягкие шлифовальные круги;

при одинаковых условиях шлифования абразивные инструменты на бакелитовой связке должны быть на две ступени тверже, чем инструменты на керамической связке;

мягкие круги экономичнее твердых, так как правятся и позволяют вести обработку с более интенсивными режимами, однако их твердость не должна быть слишком низкой, чтобы они быстро не изнашивались и не теряли форму.

В зависимости от вида обработки авторы рекомендуют применять абразивный инструмент следующей твердости:

правка абразивных инструментов, шлифование шариков, шарикоподшипников и деталей часовых механизмов — ВТ1–ВТ2;

обдирочные операции, ведущиеся вручную (обработка крупных отливок и поковок), отрезка абразивными дисками, прорезка канавок, круглое наружное шлифование методом врезания при необходимости сохранить профиль круга (например, обработка шеек коленчатых валов), бесцентровое шлифование ведущими кругами, хонингование отверстий небольших размеров — СТ2–Т2;

предварительное круглое наружное и бесцентровое шлифование сталей (преимущественно незакаленных) и ковкого чугуна кругами на бакелитовой связке — СТ2;

плоское шлифование сегментами и кольцевыми кругами на бакелитовой связке — С1–СТ1;

хонингование и резьбошлифование кругами на бакелитовой связке, профильное шлифование, обработка прерывистых поверхностей — С2–СТ2;

чистовое и комбинированное круглое наружное, бесцентровое и внутреннее шлифование стали, плоское шлифование периферией круга, резьбошлифование деталей с крупным шагом — СМ1–С2;

заточка режущих инструментов вручную — С1–С2 с механической или автоматической подачей;

плоское шлифование торцом круга СМ1–СМ2;

заточка и доводка режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, шлифование труднообрабатываемых специальных сплавов — М2–СМ2.

1.3. Структура абразивного инструмента

Под структурой абразивного круга понимается объемное содержание абразивного зерна в объеме круга (табл. 1.7 и 1.8) [7].

Объем V каждого абразивного инструмента складывается из объемов зерна $V_з$, связки $V_с$ и пор $V_п$: $V = V_з + V_с + V_п$. Это количественное соотношение можно выражать в трех различных единицах измерения: объемных; частях объема инструмента, принятого за единицу; в процентах от объема инструмента.

Для практического использования наиболее удобной оказалась объемная единица измерения в процентах, и поэтому вся система структур выражается исходя из равенства $V_з + V_с + V_п = 100$ %.

Разработанная система структур относится к инструментам с равномерным распределением зерна, связки и пор. Основой системы структуры является определение $V_з$, т. е. объемного содержания в инструменте абразивного зерна. Обозначаются структуры номерами, причем структуре № 1 соответствует объем $V_з = 60$ % и номер структуры повышается на единицу с уменьшением $V_з$ на 2 %.

Соответственно этому инструменты различных структур должны содержать количество зерен, указанное в табл. 1.7, 1.8.

Структуры с большим содержанием $V_з$, т. е. № 1–4, называют закрытыми или плотными, с малым содержанием зерна, т. е. № 9–12, — открытыми, а промежуточные между ними, т. е. № 5–8, — средними.

Таким образом, каждой структуре, независимо от зернистости и твердости инструмента, соответствует одно определенное содержание зерна в инструменте $V_з$, %. Вследствие этого для каждой данной зернистости независимо от твердости количество зерен в единице объема будет одинаковое для одной и той же структуры и разное для разных структур.

Для получения инструментов разных структур, но одной и той же твердости на керамической связке увеличивают количество связки на 2 % для каждого ближайшего большего номера структуры. Таким образом, если объем инструмента какого-либо номера структуры и какой-либо твердости состоит из суммы объемов $V_з + V_с + V_п$, то объем инструмента ближайшего большего номера структуры, но той же твердости состоит, например, из $(V_з - 2) + (V_с + 2) + V_п$. Отсюда видно, что объем пор остается постоянным у инструментов разных структур, но одной твердости.

Для получения инструментов одной и той же структуры, т. е. с одним и тем же объемным содержанием зерна $V_з$, %, но разных твердостей, увеличивают количество связки примерно на 1,5–2,0 % для каждой следующей возрастающей степени твердости. Это означает, что если объем инструмента какого-либо номера структуры и какой-либо твердости состоит из $V_з + V_с + V_п$, то объем инструмента той же структуры, но ближайшей большей степени твердости состоит из $V_з + (V_с + 1{,}5) + (V_п - 1{,}5)$.

Соответственно этому инструменты различных структур и твердостей должны содержать указанные в табл. 1.7, 1.8 объемные количества зерна $V_з$, связки $V_с$ и пор $V_п$ в процентах.

Приведенные в табл. 1.7, 1.8 числовые значения $V_з$, $V_с$ и $V_п$ характеризуют геометрическое строение черепка инструмента, а верхняя горизонтальная графа, в которой даны степени твердостей, — его физические свойства. Эта горизонтальная графа со степенями твердостей имеет по отношению к остальным

Таблица 1.7

Соотношение объемов абразивного зерна, связки и пор в обожженном абразивном инструменте

Номер структуры	Объем зерна, %	Степень твердости								
		ВМ1	ВМ2	М1	М2	М3	СМ1	СМ2	С1	С2
		Объем пор, %								
		49,5	48,0	46,5	45,0	43,5	42,0	40,5	39,0	37,5
		Объем связки, %								
0	62	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5
1	60	–	–	–	–	–	–	–	1,0	2,5
2	58	–	–	–	–	–	–	1,5	3,0	4,5
3	56	–	–	–	–	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5
4	54	–	–	–	1,0	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5
5	52	–	–	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5
6	50	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5
7	48	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5
8	46	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5
9	44	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5
10	42	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5
11	40	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5
12	38	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,0	23,0	24,5

Таблица 1.8

Соотношение объемов абразивного зерна, связки и пор в обожженном абразивном инструменте

Номер структуры	Объем зерна, %	Степень твердости								
		СТ1	СТ2	СТ3	Т1	Т2	ВТ1	ВТ2	ЧТ1	ЧТ2
		Объем пор, %								
		36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	24,0
		Объем связки, %								
0	62	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0
1	60	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0
2	58	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0
3	56	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0
4	54	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0
5	52	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0
6	50	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0
7	48	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	26,5	28,0
8	46	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0	25,5	27,0	28,5	30,0
9	44	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0	27,5	29,0	30,5	32,0
10	42	22,0	23,5	25,0	26,5	28,0	29,5	31,0	32,5	34,0
11	40	24,0	25,5	27,0	28,5	30,0	31,5	33,0	34,5	36,0
12	38	26,0	27,5	29,0	30,5	32,0	33,5	35,0	36,5	38,0

графам условный характер в том смысле, что если мы выдержим заданное таблицей строение черепка, то это еще не значит, что мы обязательно получим ту твердость, которая соответствует этому строению черепка.

Истинная твердость черепка будет зависеть от марки связки и выполнения тех операций технологического процесса производства инструмента, которые влияют на твердость получаемого инструмента (например, обжиг).

Тщательное соблюдение большого числа технологических факторов позволяет изготовлять круги с отклонениями в строении черепка на половину номера структуры в ту или другую сторону, считая все отклонения содержания связки и пор пересчитанными на объем зерна.

Рациональные структуры, которые рекомендуется применять в технологии изготовления абразивного инструмента на керамических связках в России, представлены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Рациональные структуры абразивного инструмента, изготовленного из различных абразивных материалов

Наименование абразивного материала	Обозначение зернистости по ГОСТ	Структура абразивного инструмента
Электрокорунд белый, нормальный, хром-титанистый и др.	50, 40, 32	5–6
	25, 20, 16	6–8
	12, 10, 8	8–9
	6, М63, М50, М40	10–11
	М28, М20, М14	10–11
	40, 25, 16	8–9 (открытая структура)
	40, 25, 16, 12, 10	9,10,11,12,13 (высокопористая)
Карбид кремния	40, 25	6–7
	16, 12,10	7
	8, М63	8
	М50, М49	9
	М28, М20, М14	10
	40, 25, 16, 12, 10	9, 10, 11 (высокопористая)

В табл. 1.10 приводятся номера структур, на которых выпускают инструмент ведущие зарубежные фирмы.

На выбор структуры инструмента влияют следующие факторы:

физико-механические свойства обрабатываемого материала (мягкие материалы с небольшим сопротивлением разрыву обрабатываются кругами открытых

Таблица 1.10

Номера структур абразивного инструмента ведущих зарубежных фирм

Фирма	Характеристика (тип) структуры						
	Очень плотная	Плотная	Средняя	Открытая	Очень открытая	Пористая	Высокопористая
NORTON	0,1	2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9, 10	11, 12	–	–
CARBORUNDUM	0,1	2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9, 10	11, 12	–	–
BAY STATE	0,1	2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9, 10	11, 12	–	–
NAXOS UNION	1,2	3, 4, 5	6, 7, 8	9, 10, 11	12, 13, 14	13–18	31–46
NORITAKE	1, 2	2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9, 10	11, 12	13, 14	–
FAG	0, 1	2, 3, 4	5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14	15, 16	17, 18
ATLANTC	–	3, 4	5, 6	7, 8, 9	10, 11, 12	14–18	–
TYROLIT	0–3	–	4–6	7–9	–	10–12	20–21

Фирма	Характеристика (тип) структуры						
	Очень плотная	Плотная	Средняя	Открытая	Очень открытая	Пористая	Высокопористая
MOLEMAB	–	1–4	–	5–8	9–12	13–16	17–20
WINTERTHUR	–	1–4	5–8	9, 10	–	11–19	20 – специальные
CARBORUNDUM ELECTRITE	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	–	9, 10	11, 12, 13

структур, твердые с мелкозернистым строением и хрупкие материалы — кругами закрытых структур);

требуемое качество обработки (для чистовой обработки следует использовать круги более закрытых структур, чем для предварительной или грубой обработки; для обдирки со значительным припуском рекомендуется использовать круги открытых структур);

величина давления при шлифовании (при больших давлениях следует применять круги средней и закрытой структур).

Рекомендуемые номера структуры абразивных инструментов в зависимости от вида обработки:

3–4 — фасонное шлифование при необходимости сохранить профиль круга, шлифование при больших, а также переменных нагрузках;

5–6 — круглое наружное шлифование, бесцентровое шлифование, плоское шлифование периферией круга и заточка инструмента, отрезка;

7–9 — плоское шлифование торцом круга, внутреннее шлифование;

8–9 — шлифование и заточка инструментов;

8–12 — резьбошлифование мелкозернистыми кругами.

1.4. Уравновешенность абразивных кругов

Под уравновешенностью абразивного круга понимается симметричность его объема относительно оси вращения и равномерность плотности в различных участках круга.

В процессе работы в каждом элементарном объеме круга возникает центробежная сила инерции, направленная по радиусу из центра массы этого объема. Центробежная сила инерции $P_ц = m\omega^2 r$, где m — масса рассматриваемого объема тела; ω — угловая скорость вращения тела; r — расстояние от центра массы рассматриваемого объема до оси вращения [8].

Круги имеют радиальное и торцевое биение относительно посадочного отверстия круга, зависящее от нарушения геометрических размеров круга, например эксцентриситета отверстия (рис. 1.10, *а*) и непараллельности торцев (рис. 1.10, *б*), а также неравномерность плотности в разных участках круга, в результате чего более легкая его часть имеет меньшую твердость, чем тяжелая. При обработке таким кругом он будет изнашиваться неравномерно и потребует более частой правки.

Однако и при абсолютной симметричности рабочих и нерабочих поверхностей относительно посадочного отверстия очень трудно обеспечить соосное рас-

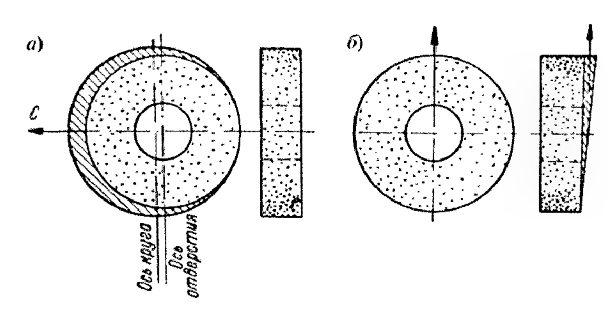


Рис. 1.10. Примеры неуравновешенности круга из-за неправильной формы:

а — эксцентриситет отверстия; *б* — непараллельность торцев

положение круга со шпинделем станка. Все это является причиной возникновения неуравновешенной силы при работе.

На качество шлифовальных кругов по неуравновешенности в значительной мере влияют способы их формования:

укладка формовочной смеси с помощью сжатого воздуха и применение гидроплиты для шлифовальных кругов высотой 40 мм и диаметром до 400 мм приводят к снижению в 1,2—2 раза величины неуравновешенных масс при одновременном уменьшении колебания твердости (неравномерной твердости) в 1,2—1,8 раза;

с увеличением наружного диаметра шлифовальных кругов от 250 до 1060 мм доминирующее влияние на формирование их неуравновешенности оказывают неравномерная плотность и непараллельность торцев, а с увеличением высоты кругов от 20 до 200 мм — эксцентриситет отверстия;

механическая обработка при существующих отклонениях формы и взаимного расположения поверхностей шлифовальных кругов после формования снижает значение неуравновешенности масс в 1,5—2 раза.

Инерционные центробежные силы неуравновешенных вращающихся масс в процессе работы кругов создают дополнительную переменную нагрузку на опоры и являются источником вибрации, ухудшающей качество обработки. Поэтому при изготовлении и эксплуатации абразивные круги нужно обязательно балансировать.

Различают статическую, моментную и динамическую неуравновешенность круга. *Статическая неуравновешенность* — такая неуравновешенность шлифовального круга, при которой ось круга и его главная центральная ось инерции параллельны и не совпадают между собой (рис. 1.11, *а*). При этом под осью круга *1—1* понимается прямая, соединяющая центры тяжести контуров поперечных сечений середин несущих поверхностей круга, а под главной центральной осью инерции *2—2* — центральная ось круга, относительно которой центробежные моменты инерции равны нулю.

Моментной неуравновешенностью называют неуравновешенность круга, при которой ось круга *1—1* и его главная центральная ось инерции *2—2* пересекаются в центре масс круга (рис. 1.11, *б*). *Динамической неуравновешенностью* называют неуравновешенность круга, при которой ось круга *1—1* и его главная цен-

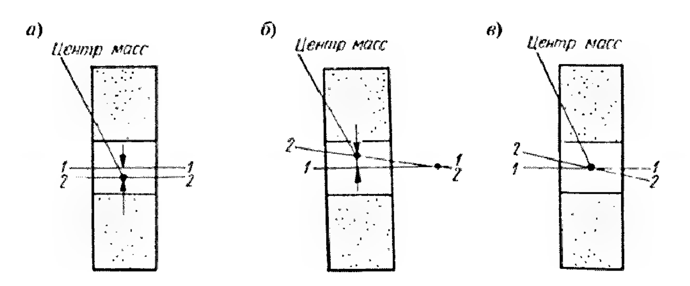


Рис. 1.11. Положение центра масс круга относительно оси при статической (*а*), моментной (*б*), динамической (*в*) неуравновешенности:
1–1 — ось круга; *2–2* — главная центральная ось инерции

тральная ось инерции *2–2* или перекрещиваются, или пересекаются не в центре масс (рис. 1.11, *в*).

При контроле неуравновешенности шлифовального круга используют такие понятия, как эксцентриситет массы, точечная неуравновешенность и дисбаланс, под *эксцентриситетом массы* понимают смещение центра масс круга относительно его оси, под *точечной неуравновешенной массой* — условную точечную массу с заданным эксцентриситетом, вызывающую во время вращения круга переменные нагрузки на опорах и изгиб шпинделя, на который устанавливается круг во время эксплуатации. *Дисбалансом* шлифовального круга называется векторная величина, равная произведению неуравновешенной массы на ее эксцентриситет. Для шлифовальных кругов массой 0,2–300 кг и наружным диаметром свыше 100 мм регламентированы допустимые точечные неуравновешенные массы, которые для каждого дисбаланса масс кругов распределены на четыре класса неуравновешенности (ГОСТ 3060–86 "Круги шлифовальные. Допустимые неуравновешенные массы и метод их измерения"). Контроль и уменьшение неуравновешенности до допустимых значений, производимые на абразивных заводах в процессе изготовления кругов, относятся к статической балансировке, т. е. балансировке, в процессе которой контролируется и устраняется статическая неуравновешенность.

Значения допустимых неуравновешенных масс должны соответствовать определенным величинам, указанным в табл. 1 ГОСТ 3060–86.

Однако следует подчеркнуть, что абразивные круги на керамической связке не изготавливают четвертым классом неуравновешенности. В настоящее время все потребители требуют круги первого-второго класса неуравновешенности и очень редко соглашаются на третий класс (это в основном круги диаметром 500–600 мм и высотой 150–200 мм).

Что касается кругов класса АА и скоростных кругов, то они должны изготавливаться только первого класса неуравновешенности. Ниже представлен как пример фрагмент таблицы из ГОСТ 3060–86 (табл. 1.11) — значения допустимых неуравновешенных масс в зависимости от диаметра круга.

Для контроля неуравновешенности применяют балансировочные станки, конструктивно выполненные в виде станины и связанных с ней направляющих (ножей), а также балансировочных оправок (рис. 1.12 и 1.13). Шлифовальный

Таблица 1.11

Значения допустимых неуравновешенных масс для абразивных кругов различных диаметров

Размеры абразивного круга, мм		Значения неуравновешенных масс по классам			
Наружный диаметр, мм	Высота, мм	1	2	3	4
От 200 до 500	16	16	25	40	60
	25	20	30	50	80
	250–400	60	100	160	250
От 1000 до 1250	16–25	30	50	90	120
	40–63	50	90	140	200

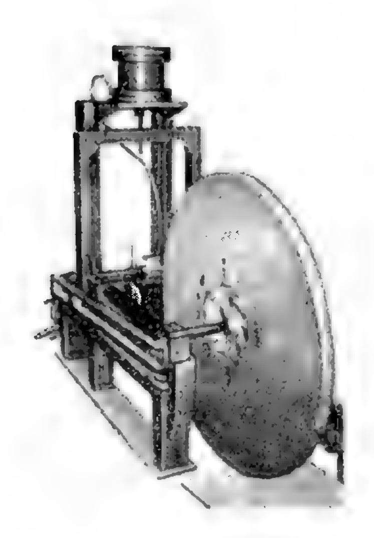


Рис. 1.12. Балансировочный станок (общий вид)

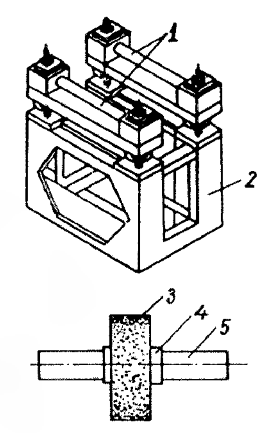


Рис. 1.13. Схема балансировочного станка с параллельными валиками:

1 — балансировочные валики; *2* — станина; *3* — балансируемый шлифовальный круг; *4* — конусная втулка; *5* — оправка

круг устанавливают на направляющих станка для статической балансировки с помощью балансировочной оправки и легким толчком придают кругу медленное вращение. Естественно, что тяжелая часть круга стремится занять крайнее нижнее положение. После остановки круга отмечают верхнюю точку его периферии и прикрепляют к ней зажим. Затем поворачивают круг с зажимом на 90° и посредством зажима крепят грузы к его наружной поверхности.

Путем подбора груза приводят круг к состоянию, при котором он после ряда легких толчков устанавливается в произвольное положение. Суммарная масса груза и зажима определяет неуравновешенную массу круга. В соответствии с таблицей неуравновешенных масс производится проверка соответствия круга заданному классу неуравновешенности. Круги с неуравновешенностью, превышающей допускаемую, бракуют.

При использовании шлифовальных кругов в зависимости от точности установки во фланцах и шпинделе станка неуравновешенность круга может изменяться. Поэтому круги подвергают балансировке непосредственно на шлифовальном станке, для чего предусмотрены специальные фланцы и балансировочные механизмы.

Таблица 1.12

Технические характеристики станков для балансировки шлифовальных кругов

Техническая характеристика	Станок модели СБ-250	Станок модели СБ-400
Размеры валов, мм		
Длина	300	600
Диаметр	20–30	60
Расстояние между центрами	200	400
Размеры оправок, мм		
Длина	250	500
Длина посадочного места	50	50–100
Размеры проверяемых кругов, мм		
Наружный диаметр	100–300	175–1100
Внутренний диаметр	20–127	75–305
Высота	6–100	10–250
Габаритные размеры длина × ширина × × высота, мм	470 × 250 × 285	612 × 640 × 840
Масса станков, кг	31,4	96,0

Техническая характеристика применяемых в абразивной промышленности балансировочных станков типа параллели с различными метрологическими параметрами приведена в табл. 1.12.

1.5. Прочность абразивного инструмента

Под прочностью абразивного инструмента понимается сопротивляемость инструмента механическим нагрузкам.

Абразивный инструмент, воспринимающий в процессе работы различные по характеру и величине нагрузки, для безопасной работы у потребителей должен обладать достаточным запасом прочности. Сопротивляемость инструмента нагрузкам зависит от таких его характеристик, как марка абразивного материала и его зернистость, вид связки, твердость и структура круга, а также от соотношения радиуса отверстия круга к радиусу круга.

Например, прочность абразивного инструмента из карбида кремния значительно ниже прочности инструмента из электрокорундовых материалов. Уменьшение твердости инструмента и увеличение зернистости шлифовального материала приводят к снижению прочности инструмента. Кроме того, на прочность большое влияние оказывает качество технологии производства абразивных инструментов. Например, в шлифовальных кругах на керамической связке при резких температурных перепадах во время обжига, особенно в процессе охлаждения, возникает внутреннее напряжение, что также снижает их прочность.

Абразивный инструмент на разных связках по-разному сопротивляется механическим усилиям. Общим для всех видов абразивного инструмента является резкое различие в прочности на сжатие и растяжение. Предел прочности на сжатие превышает предел прочности на растяжение инструмента на керамической связке в шесть-восемь раз, на бакелитовой связке — в три-четыре раза, а на вулканитовой — несколько ниже.

Вторым общим признаком для инструмента на всех видах связки является увеличение временного сопротивления при всех видах деформации с повышением твердости и с уменьшением зернистости абразивного материала.

Инструменты на керамической связке практически являются хрупкими телами, т. е. до момента разрушения остаточных (пластических) деформаций в них не возникает. Пропорциональность между значением деформации и нагрузкой сохраняется все время.

Магнезиальная и силикатовая связки аналогичны керамической по хрупкости, но менее прочны, чем керамическая.

Бакелитовая связка на растяжение (и изгиб) прочнее керамической. Для инструмента на бакелитовой связке играет роль время выдерживания под нагрузкой, так как у него при каждой нагрузке деформация несколько увеличивается с течением времени.

Вулканитовая связка более прочна на изгиб и растяжение, чем бакелитовая и тем более керамическая, и имеет более значительные упругие деформации.

Для увеличения механической прочности абразивного инструмента используются упрочняющие элементы. Прежде всего, это металлические детали: кольца, впрессованные в обдирочные круги; металлические диски для упрочнения кругов на керамической связке для рабочих скоростей до 80 м/с; фланцы для лепестковых кругов. В отрезных, зачистных и обдирочных кругах на органических связках, работающих при рабочих скоростях 80 м/с и выше, в качестве упрочняющего элемента используются диски, вырезанные из стеклосетки с размером ячеек от 3 до 6 мм и толщиной нити от 0,4 до 2 мм. Наличие упрочняющей сетки указывается в маркировке кругов буквой "У". Известны случаи использования и углеволокон для упрочнения инструмента. Однако низкая адгезия к органическим связкам и высокая стоимость сдерживают на сегодняшний день их применение.

Шлифовальный круг при вращении испытывает нормальные и тангенциальные напряжения, значения этих напряжений выражаются известными формулами [8]

$$\sigma_{r\,\max} = \frac{\gamma v^2}{g}\frac{3+\mu}{8}\left(1-\alpha^2\right),\ \text{МПа}; \qquad (1.1)$$

$$\sigma_{t\,\max} = \frac{\gamma v^2}{g}\frac{3+\mu}{8}\left(1+\frac{1-\mu}{3+\mu}\alpha^2\right),\ \text{МПа}, \qquad (1.2)$$

где γ — объемный вес круга, г/см^3; v — окружная скорость круга, см/с; g — ускорение силы тяжести, кгс/см^2; μ — коэффициент Пуассона, равный 0,2–0,3; $\alpha = H/D$ (D — диаметр круга, H — диаметр посадочного отверстия).

Из формул (1.1) и (1.2) видно, что тангенциальные напряжения растут интенсивнее, чем нормальные, увеличиваясь от периферии к центру круга, и достигают максимального значения у края отверстия.

Наибольшими напряжениями во вращающемся круге являются напряжения на растяжение на стенке отверстия круга. Это растяжение пропорционально массе единицы объема круга и квадрату его окружной скорости и зависит от соотношения радиусов круга и его отверстия *R*/*r*, т. е. при увеличении диаметра отверстия напряжение увеличивается. В результате исследования сил, действующих на инструмент в процессе работы, было установлено, что основную опасность представляют центробежные силы. Именно они при вращении круга вызывают в нем напряжения, близкие по значению к временному сопротивлению материала круга и могут привести к разрыву круга. Силы резания, возникающие в процессе шлифования, создают напряжение на сжатие, которое ничтожно мало по сравнению с временным сопротивлением на сжатие инструмента, и поэтому практической опасности не представляют. В связи с вышеуказанным основным методом испытания кругов является вращение их со скоростью, превышающей рабочую.

Значение превышения испытательной скорости над рабочей, а также другие правила испытаний прочности кругов вращением и ряд дополнительных мероприятий по безопасности при работе со шлифовальными кругами изложены в ГОСТ 12.3.028–82 и ГОСТ 30513–97 "Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности", а также в "Правилах безопасности для абразивов на связках и прецизионных суперабразивов". С 1 января 2008 года вводится ГОСТ Р52588–2006 "Инструмент абразивный. Требования безопасности".

Механическая прочность шлифовальных кругов должна контролироваться в соответствии с режимами испытаний, представленными в табл. 1.13.

ГОСТом также установлена обязательная проверка механической прочности у потребителя, так как круги в процессе хранения, упаковки и транспортировки могут быть повреждены. Кроме того, нельзя работать кругами со скоростью (об/мин), превышающей указанную в маркировке на круге. Превышение скорости является одной из главных причин разрыва круга. Например, фрагмент разорвавшегося круга, работающего со скоростью 35 м/с, летит со скоростью 128 км/ч, а фрагмент круга, работающего со скоростью 125 м/с, летит со скоростью 448 км/ч [9], что представляет большую опасность для персонала.

Таблица 1.13

Режимы испытаний шлифовальных инструментов на механическую прочность

Вид абразивного инструмента	Наружный диаметр, мм	Рабочая скорость $V_р$, м/с	Испытательная скорость $V_и$, м/с
Шлифовальные круги на керамической и органической связках	≥ 150	≤ 40, свыше 40 до 80	1,5 $V_р$
В том числе эльборовые и лепестковые, а также фибровые шлифовальные диски	≥ 30	Свыше 80 до 120	1,4 $V_р$
Отрезные круги	≥ 250	≤ 120	1,3 $V_р$
Отрезные круги для ручных шлифовальных машин	≥ 150	≤ 120	1,3 $V_р$
Гибкие полировальные круги на вулканитовой связке	≥ 200	≤ 25	1,3 $V_р$

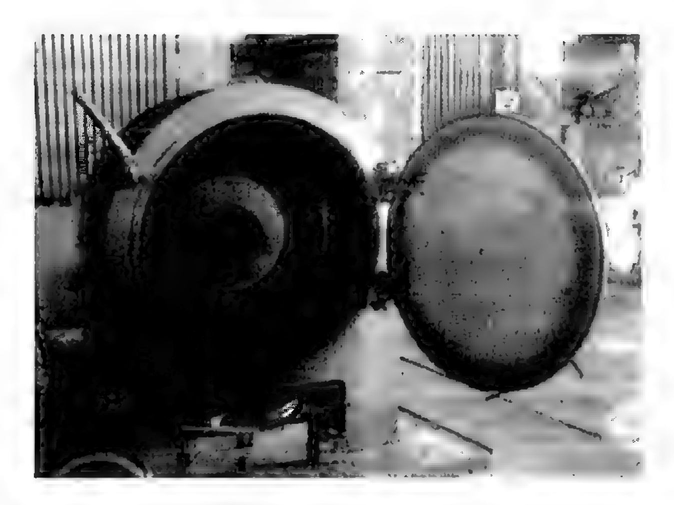


Рис. 1.14. Станок модели СИП для испытания кругов на прочность

Для испытания на прочность абразивных кругов разработаны различные модели станков и автоматов с вертикальным и горизонтальным расположением шпинделя для кругов, работающих при скорости 25–60 м/с (модели СИП и АИП) (рис. 1.14) [10].

Кроме того, создан ряд станков для испытания кругов, предназначенных для силового и скоростного шлифования с рабочей скоростью 80–100 м/с и позволяющих развивать испытательную скорость до 165 м/с. Липецким станкозаводом изготовлен и испытан станок модели СИП-1000С для кругов диаметром 600–1000 мм, работающих со скоростью до 100 м/с, а Лубенским станкозаводом "Коммуна" изготовлен станок модели СИП-2000С для кругов диаметром 1200–2000 мм, работающих со скоростью до 120 м/с.

На всех станках измерение частоты вращения шпинделя производится специальным электронным устройством с цифровой индикацией, обеспечивающей измерение в пределах ±1 %.

Основные характеристики станков для испытания шлифовальных кругов представлены в табл. 1.14.

Для восприятия ударных нагрузок от осколков разорвавшегося круга в станине станка устанавливается массивное стальное кольцо на резиновых прокладках.

При испытаниях круг зажимается на шпинделе станка, испытательная камера закрывается и шпиндель приводится во вращение от электродвигателя, обеспечивающего плавное изменение скорости вращения круга по заданной программе.

По окончании испытания вращение шпинделя прекращается, открывается камера и круг снимается. В случае разрыва куски круга ссыпаются вниз и убираются.

Таблица 1.14

Технические характеристики станков для испытания шлифовальных кругов

Модель станка	Техническая характеристика				Размеры абразивного круга, мм		
	Частота вращения шпинделя, об/мин	Мощность двигателя, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Наружный диаметр	Высота	Диаметр отверстия
СИП-200	3500–1400	8	1480 × 1060 × 1740	1700	125–250	10–100	32–76
СИП-400	1500–6300	11	1650 × 1550 × 1260	5000	240–450	10–200	–
СИП-800	2200–9550	11	2050 × 1340 × 1200	2950	600–800	10–150	305
СИП-1200	500–1800	11	3160 × 3300 × 3120	12000	750–1100	40–200	305
АИП-200	3500–14000	8	1480 × 1060 × 1740	1700	125–250	10–100	–
АИП-400	1590–6900	11	2435 × 1550 × 1890	7100	250–450	10–200	–
АИП-800	900–3200	11	3600 × 1800 × 2200	11500	500–750	10–200	–

Перед установкой в испытательный станок абразивный круг должен быть тщательно осмотрен (к проверке на механическую прочность не допускаются круги с трещинами, сколами и т. д.).

1.6. Типы шлифовального инструмента

Форма и размер абразивного инструмента определяются в зависимости от конструкции и назначения шлифовального станка, его размеров, конструкции крепежного приспособления, формы и размеров обрабатываемых деталей, а также площади контакта инструмента с поверхностями обрабатываемых деталей.

Наиболее просты по форме и универсальны по применению круги типа 1 (табл. 1.15), представляющие собой тела вращения, у которых имеется центральное отверстие для их установки на оправку или шпиндель станка.

Таблица 1.15

Типы шлифовальных кругов из электрокорунда и карбида кремния и область их применения (выполняемые ими операции)

Типы шлифовальных кругов			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
Прямого профиля	1 (ПП)		Круглое и наружное шлифование
С односторонней выточкой	5 (ПВ)		Бесцентровое шлифование
Круги с двухсторонней выточкой	7 (ПВД)		Внутреннее шлифование
С двухсторонней выточкой и ступицей	10 (ПВДС)		Плоское шлифование

Типы шлифовальных кругов			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
С конической и цилиндрической выточками с одной стороны	23 (ПВК)		Плоское шлифование
С конической и цилиндрической выточками с обеих сторон	26 (ПВДК)		Плоское шлифование
Кольцевые	2 (К)		Плоское, торцевое шлифование
С коническим профилем	3 (3П)		Зубошлифование, заточка режущего инструмента
С двухсторонним коническим профилем	4 (2П)		Шлифование резьбы (резьбошлифование)
Чашечные цилиндрические	6 (ЧЦ)		Плоское, торцевое шлифование
конические	11 (ЧК)		Плоское, торцевое шлифование и заточка
Тарельчатые	12 (Т)		Зубошлифование и заточка
	14 (Т)		
Кольцевые с запрессованными крепежными элементами	36 (ПН)		Плоское, торцевое шлифование
С утопленным центром	27		На ручных машинках (зачистка сварных швов, подготовка под покрытие)
Отрезные	–		Прорезка пазов, шлифование пазов, отрезка материала

При работе на станках круги своим отверстием надеваются на цилиндрическую посадочную часть и соединяются со шпинделем станка для совместного с ним вращения посредством зажимных фланцев или других деталей, зажимающих внутреннюю часть его плоских торцевых поверхностей. Между кругом и фланцем кладут картонные прокладки для более равномерного распределения давления по всей зажимаемой поверхности.

Конструктивное выполнение крепления кругов нормировано ГОСТ 2270–78, а также указано в материалах Федерации европейских производителей абразивов (FEPA) "Правила безопасности для абразивов на связках и прецизионных суперабразивов".

Круги небольших размеров надеваются своими отверстиями на гладкую часть винта, ввинчиваемого в конец шпинделя, и зажимаются между головкой

этого винта и торцом шпинделя или же надеваются не на винт, а на тонкий конец шпинделя. Более крупные круги с малыми и средними размерами отверстий (до 40 мм) надеваются на конец шпинделя и крепятся на нем зажимными фланцами.

Круги других форм, например головки, бруски, сегменты, предназначены для работы на станках специального назначения.

Абразивные головки в отличие от кругов имеют небольшой диаметр и глубокое центральное отверстие, в которое посредством клеящего вещества крепится оправка, имеющая в месте соединения с головкой накатку или специальные канавки, а для крепления в патроне шпинделя — цилиндрический хвостовик (табл. 1.16).

Таблица 1.16

Типы шлифовальных головок из электрокорунда и карбида кремния и область их применения (выполняемые ими операции)

Типы шлифовальных головок			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
Цилиндрические	AW		Для внутреннего шлифования
Угловые	DW		Абразивная обработка штампов, матриц, пресс-форм, зачистка отливок сварных конструкций
Конические с углом 60°	EW		То же
Сводчатые	F-1W		"
Конические с закругленной вершиной	KW		"
Шаровые	F-2W		"
Шаровые с цилиндрической боковой поверхностью	FW		"

Абразивные инструменты прямолинейной формы, предназначенные для ручной и машинной работы, называют брусками. В процессе обработки они, как правило, работают своей продольной поверхностью. Для машинной обработки (хонингование и суперфиниширование) используют бруски БКв и БП. Остальные типы брусков применяют для ручной работы (табл. 1.17). При машинной работе шлифовальные бруски вклеивают в укрепляемые на станках держатели, обычно имеющие борты, охватывающие часть боковых поверхностей бруска для большей надежности крепления.

Таблица 1.17

Типы абразивных брусков из электрокорунда и карбида кремния и область их применения (выполняемые ими операции)

Типы абразивных брусков			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
Квадратный	БКв		Хонингование, суперфиниширование
Прямоугольный	БП		То же
Треугольный	БТ		Для ручной работы
Круглый	БКр		То же
Полукруглый	БПКр		"

Шлифовальные сегменты предназначены для оснащения различных сборных конструкций абразивных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Сегменты крепятся по окружности патрона и образуют шлифовальный круг с прерывистой кольцевой поверхностью, работающей торцом и выполняющей плоское шлифование. Сегментный круг по сравнению с кольцевым (см. табл. 1.15, тип 2) дает некоторое снижение шероховатости, но позволяет работать с более интенсивными режимами. Различная форма сегментов (табл. 1.18) обусловлена различиями в конструкции патронов на существующих станках. Сегмент зажимают в гнездах патрона, укрепленного на шпинделе станка.

Таблица 1.18

Типы шлифовальных сегментов из электрокорунда и карбида кремния и область их применения (выполняемые ими операции)

Типы шлифовальных сегментов			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
Прямоугольные	СП		Для обработки металлических заготовок
Выпукло-вогнутые	1С		То же
Вогнуто-выпуклые	2С		"
Выпукло-плоские	3С		"

Типы шлифовальных сегментов			Область применения
Наименование	Обозначение	Эскиз	
Плоско-выпуклые	4С		“
Трапециевидные	5С		“
Специальные	7С		“
	6С		Для обработки мозаичных покрытий
	8С		Для обработки мрамора, гранита и других облицовочных материалов
	9С		То же
	10С		“
	11С		“

Специальный нестандартный инструмент изготавливают по заказам потребителей. Некоторые типы нестандартных специальных абразивных кругов, изготовляемых по чертежам потребителей, приведены на рис. 1.15.

Для шлифования и доводки различных деталей в машиностроении широко применяются абразивные шкурки, изделия из них, ленты и диски (Приложение 1). Они, как правило, используются в качестве абразивосодержащего слоя абразивного инструмента различных конструкций. Однако существуют методы обработки, когда абразивная лента выполняет функции собственно инструмента. При этом детали шлифуют либо при свободном натяжении ленты, либо когда лента дополнительно прижата к обрабатываемой поверхности специальным копиром или роликовой опорой. Шлифовальные ленты бывают с тонким (1—2 мм) и толстым (3—8 мм) слоем абразивного зерна. Более широкое применение из-за высокой производительности и низкой стоимости получили ленты с тонким слоем абразивного зерна, соединенного связкой с основой.

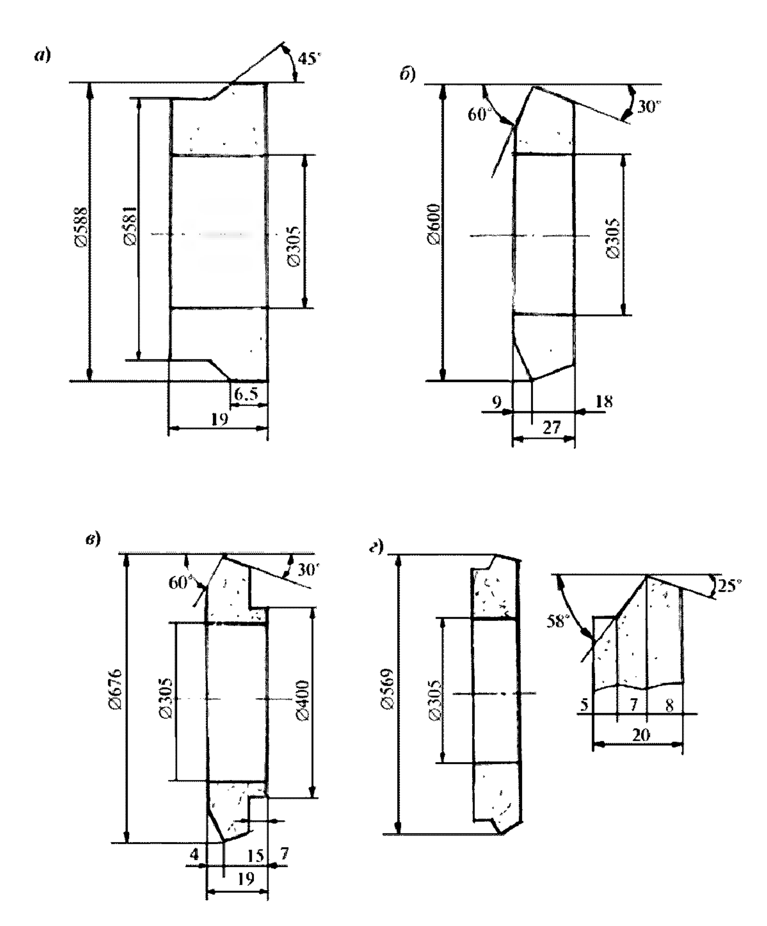


Рис. 1.15. Примеры видов специальных нестандартных кругов

Для получения необходимой точности и шероховатости обрабатываемой поверхности абразивный инструмент должен иметь минимальные отклонения формы и размеров (в первую очередь для рабочих и опорных поверхностей).

Точность геометрических размеров абразивного инструмента регламентируется соответствующими стандартами. Согласно ГОСТ 2424–83 установлены предельные отклонения следующих параметров абразивных кругов: наружного диаметра *D*, высоты *T*, диаметра посадочного отверстия *d*, непараллельности, выпуклости, овальности наружных поверхностей, конусообразности и смещения оси отверстия.

Шлифовальные круги изготавливают трех классов точности: АА, А, Б (табл. 1.19–1.23). Для сравнения в таблицах представлены также данные по европейскому стандарту ISO/FDIS 13942.

Наибольшая точность соответствует кругам класса АА. Допускаемые отклонения для инструментов класса Б в 1,5–2 раза превышают отклонения от аналогичных параметров кругов класса А, которые, в свою очередь, больше соответствующих отклонений по классу АА.

Для обеспечения соосности круга с осью шпинделя большое значение имеет точность изготовления посадочного отверстия.

Таблица 1.19

Предельные отклонения размеров абразивных кругов от заданных по отечественному и зарубежным техническим требованиям

Размеры круга	Предельные отклонения для классов точности				
	ГОСТ 2424–83			ISO/FDIS 13942	
	АА	А, Б		*D*	T_D
Наружный диаметр *D*, мм:					
до 6	±0,3	±0,4		3–8	±0,5
свыше 6 до 30	±0,5	±0,8		8–20	±0,8
свыше 30 до 50	±0,8	±1,2		20–50	±1,2
свыше 50 до 80	±1,0	±1,6		–	–
свыше 80 до 180	±1,2	±2,0		50–125	±2,0
свыше 180 до 260	±1,5	±2,7		125–300	
свыше 260 до 500	±2,0	±4,0		–	–
свыше 500 до 800	±2,5	±5,0		300–762	±5,0
свыше 800	±3,0	±6,0		762–2000	–
Высота *T*, мм:	АА	А, Б		*T*	T_D
до 3	±0,1	±0,3		0,4–1,6	±0,1
свыше 3 до 6	±0,15	±0,5		1,6–5,0	±0,15
свыше 6 до 10	±0,20	±0,6		5–16	±0,20
свыше 10 до 16	±0,20	±0,9		5–16	±0,20
свыше 16 до 40	±0,20	±1,2		16–50	±0,20
свыше 40 до 100	±0,25	±1,4		50–160	±0,25
свыше 100	±0,3	±2,0		160–500	±0,25
Диаметр посадочного отверстия (кроме типов 36, 2) *H*	АА	А, Б		*H*	T_H
до 10	+0,1	+0,2	+0,2	1,6–50	+0,16
свыше 10 до 18	+0,1	+0,2	+0,3	–	+0,16
свыше 18 до 50	+0,1	+0,2	+0,3	1,6–50	+0,16
свыше 50 до 80	+0,2	+0,2	+0,4	50–80	+0,19
свыше 80 до 120	+0,2	+0,2	+0,5	80–180	+0,25
свыше 120 до 180	+0,2	+0,3	+0,5	80–180	+0,25
свыше 180 до 260	+0,2	+0,3	+0,6	180–250	+0,29
	+0,3	+0,4	+0,6	250–315	+0,32
свыше 260	–	–		315–400	+0,36
	–	–		400–500	+0,40
	–	–		500<H	+0,44

Таблица 1.20

Допуски параллельности и плоскостности абразивных кругов

Диаметр круга D, мм	Допуски параллельности для классов точности		
	АА	А	Б
До 160	0,1	0,15	0,25
Свыше 160 до 500	0,15	0,25	0,40
Свыше 400	0,2	0,40	0,50

Таблица 1.21

Допуски круглости (овальности) наружной поверхности абразивных кругов для различных классов точности

Диаметр круга D, мм	Допуски овальности кругов для классов точности		
	АА	А	Б
До 18	0,1	0,25	0,5
Свыше 18 до 120	0,1	0,40	0,9
Свыше 120 до 500	0,2	0,70	1,3
Свыше 500	0,2	1,10	1,9

Таблица 1.22

Допуски профиля продольного сечения (конусообразность) наружной поверхности абразивных кругов (кроме типа 11) для различных классов точности

Диаметр круга D, мм	Допуски на конусообразность наружной поверхности круга для классов точности		
	АА	А	Б
До 40	0,2	0,3	0,5
Свыше 40 до 100	0,3	0,5	1,0
Свыше 100 до 500	0,5	0,8	2,0

Таблица 1.23

Допуски смещения оси отверстия (эксцентриситет) абразивных кругов для различных классов точности

Диаметр круга D, мм	Допуски на эксцентриситет круга для классов точности		
	АА	А	Б
До 18	0,10	0,15	0,20
Свыше 18 до 120	0,15	0,20	0,30
Свыше 120 до 260	0,20	0,25	0,40
Свыше 260	0,25	0,35	0,50

Анализ данных табл. 1.19 показывает, что предельные отклонения по наружному диаметру отечественных кругов класса АА значительно жестче, чем требования по европейскому стандарту.

Глава 2

ПРОИЗВОДСТВО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Из всего объема выпускаемой абразивной продукции 48 % приходится на инструмент, изготовляемый на керамической связке, что объясняется рядом таких важнейших свойств этих связок, как химическая стойкость, водостойкость, сравнительно высокая прочность на разрыв.

Инструменты на керамической связке обеспечивают достаточно высокую производительность при их работе, хорошо сохраняют профиль, имеют высокую пористость и хорошо отводят тепло.

Абразивный инструмент на керамической связке может быть изготовлен из всех видов абразивных материалов: электрокорундов белого, нормального, монокорунда и корунда, полученного золь—гель-методом, карбида кремния черного и зеленого, а также из смесей в различных соотношениях.

Основным недостатком абразивного инструмента на керамической связке является достаточно высокая хрупкость (ударная вязкость), которая делает абразивные инструменты чувствительными к ударной нагрузке, вследствие чего они не могут использоваться при обдирочном, отрезном и силовом шлифовании. Относительно низкий предел механической прочности при изгибе не допускает применения тонких абразивных кругов на керамической связке для отрезных работ при их разрушении при действии боковой нагрузки, изгибающей инструменты.

Шлифовальные круги на керамических связках различного состава обычно используются в процессе шлифования при окружной скорости 35; 45 м/с (инструмент из карбида кремния), при скоростях 35, 50, 60 м/с (инструмент из электрокорундовых материалов), а круги, работающие при скоростях 80—100—120 м/с, изготавливаются по специальной технологии, обеспечивающей их прочность.

В России на керамических связках выпускается 1100 типоразмеров абразивных инструментов различного профиля, характеристик и назначений; круги диаметром от 0,85 до 1400 мм, зернистостью 1—500 мкм из электрокорундовых и карбидкремниевых материалов от чрезвычайной твердости до весьма мягких, различных структур и с регулируемой пористостью.

В качестве материала для изготовления абразивных кругов на керамической связке служат шлифзерно, шлифпорошки, микропорошки и субмикропорошки абразивных материалов, связка, временное связующее и увлажнители формовочной смеси.

Абразивный инструмент на керамической связке выпускается из белого электрокорунда марки 25А, нормального электрокорунда марок 13А и 14А по ГОСТ 28118—90, карбида кремния зеленого марок 63С и 64С и карбида кремния черного марок 53С, 54С по ГОСТ 26327—84. Микропорошки из белого электрокорунда выпускаются по ТУ 3980-075-00224450—99, а микропорошки особо тонкие из электрокорунда белого —по ТУ 3980-005-00658716—2000.

Таблица 2.1

Зернистость шлифовальных материалов, используемых для изготовления абразивного инструмента на керамической связке

Группа шлифовального материала	Обозначение зернистости по ГОСТ 3647–80	Размер зерен основной фракции, мкм	Обозначение по стандарту ИСО 8486
Шлифзерно	200 (F 10)	2500–2000	10
	160 (F 12)	2000–1600	12
	125 (F 16)	1600–1250	16(14)
	100 (F 20)	1250–1000	20
	80 (F 24)	1000–800	22
	63 (F 30)	800–630	30
	50 (F 36)	630–500	36
	40 (F 46)	500–400	40
	32 (F 54)	400–315	54(46)
	25 (F 60)	315–250	60
	20 (F 70)	250–200	70
	16 (F 90)	200–160	80
Шлифпорошки	12 (F 100)	160–125	100
	10 (F 120)	125–100	120
	8 (F 115)	100–80	150(180)
	6 (F 180)	80–63	220
	5 (F 220)	63–50	–
	4	50–40	–
Микро-шлифпорошки	М63	63–50	230
	М50	50–40	240
	М40	40–28	280
	М28	28–20	360
	М20	20–14	400
	М14	14–10	500
Тонкие микро-шлифпорошки	М10	10–7	600
	М7	7–5	800
	М5	5–3	1000
	М3	3–2	1200

Примечание. В скобках указана зернистость по ГОСТ Р 52381.

Остальные абразивные материалы в настоящее время в России не выпускаются, и российские производители абразивного инструмента покупают абразивные материалы из стран СНГ и у зарубежных фирм Китая, Австрии и США.

Зернистость используемых для изготовления инструмента абразивных материалов по ГОСТу и стандарту ИСО 8486 представлена в табл. 2.1.

2.1. Сырьевые материалы для производства керамических связок

Сырьевые материалы, используемые для производства керамических связок, можно разделить условно на несколько групп:

плавкие природные (полевые шпаты, пегматиты, нефелины, щелочные каолины, трахиты, перлит, обсидиан и др.) и синтетические (стекла, фрит-

ты, эмали, стеклокристаллические материалы), определяющие температуру плавления и реологические свойства керамических связок в процессе обжига абразивных инструментов;

глинистые пластификаторы — огнеупорные глины и каолины, обеспечивающие необходимую прочность заготовок абразивных изделий после их формования и сушки;

добавки-модификаторы, природные (тальк, волластонит, известковая мука, гипс) и синтетические (криолит), улучшающие физико-механические свойства абразивно-керамического черепка.

Основными сырьевыми компонентами (по объему потребления) являются полевошпатовые материалы, глинистые материалы и фритты (стекла).

Абразивная промышленность не имеет стандартов или технических условий, официально рекомендующих качество минерального сырья для производства керамических связок. Только технические условия на мамский полевой шпат были согласованы с абразивной отраслью. Поэтому часто для изготовления керамических связок используется сырье, применяемое в керамической, стекольной, огнеупорной и других отраслях промышленности. Такое положение с технической документацией сохранилось до настоящего времени. Отдельные абразивные заводы в настоящее время вынуждены согласовывать технические требования к сырью либо получать сырье по условиям контрактов.

2.1.1. Полевошпатовое сырье и его заменители

К полевошпатовому сырью в соответствии с современными представлениями относятся интрузивные, эффузивные, осадочные неизмененные и измененные кислые, а также частично средние и основные алюмосиликатные породы полевошпатового (сиениты, трахиты), кварцево-полевошпатового (пегматиты, граниты, пески и т. д.), серицит-полевошпатово-кварцевого (сланцы, вторичные кварциты), каолинит-полевошпатово-кварцевого (пески, щелочные каолины, вторичные кварциты), нефелин-полевошпатового (нефелиновые сиениты, щелочные пегматиты, нефелинолиты) состава, которые могут быть использованы без обогащения или после него в качестве технологического сырья [11–12].

Полевые шпаты, как было уже указано, представляют собой алюмосиликаты щелочных и щелочно-земельных металлов. Эти минералы являются составной частью многих изверженных горных пород (гранит, гнейс и др.). Полевые шпаты довольно тверды (средняя твердость по шкале твердости Мооса 6), плотность колеблется от 2,5 до 2,8 г/см^3, понижаясь при нагреве до 2,33 г/см^3. Их подразделяют на три основные группы: калиевые полевые шпаты, натриевые полевые шпаты и кальциевые полевые шпаты.

Калиевые полевые шпаты (ортоклазы) $K_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2$ иногда встречаются в виде весьма крупных кристаллов, однако чаще в виде мелкозернистых масс. Ортоклазы непрозрачны, имеют характерный стеклянный или перламутровый блеск. Цвет — белый, серый, желтый или красный.

Калиевый полевой шпат является породообразующим минералом многих видов магматических метаморфических и осадочных горных пород, однако единственным источником промышленного получения калиевого шпата в России

и странах СНГ до настоящего времени остаются гранитные пегматитовые жилы дифференцированного строения, из которых вручную отсортировываются крупноблочные выделения микроклина. Выход кускового микроклина из жильной массы, как правило, не превышает 4–5 %.

Натриевые полевые шпаты (альбиты) $Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2$ образуют кристаллы, сходные с кристаллами ортоклаза. В отличие от ортоклаза они не бывают крупными. Альбиты залегают в виде мелкозернистых масс. Альбит более прозрачен, чем ортоклаз, и просвечивает в тонких слоях. Цвет — белый, серый, слегка голубоватый, зеленоватый или красноватый.

Кальциевые полевые шпаты (анортиты) $CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$ кристаллизуются, как ортоклазы и альбиты (мелкие кристаллы и крупные кристаллические массы). Цвет — белый, серый, желтоватый или голубоватый. Анортит плавится при 1550 °С, кристаллизуется при охлаждении и обладает малой химической стойкостью, что делает его неприменимым при производстве керамических связок.

Кроме указанных основных типов известны еще и другие полевые шпаты, например бариевые полевые шпаты $BaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$ (цельзианы), но они так же редко применяются для керамических связок.

В табл. 2.2 представлены состав и свойства чистых шпатов.

Упомянутые основные типы полевых шпатов встречаются в различных модификациях и в смешанных кристаллах.

Полевой шпат, предназначенный для производства керамических изделий, должен быть тонко измельчен. Для облегчения помола его обычно предварительно слабо прокаливают (до температуры 700–800 °С), а затем быстро охлаждают — происходит разрыхление крупных кусков. Этому способствуют включения кварца.

Основное требование, предъявляемое к полевому шпату как к плавню, сводится к тому, чтобы при сравнительно низкой температуре обжига керамического изделия он образовывал полевошпатовое стекло в виде однородной белой или бесцветной расплавленной стекловидной массы, отличающейся вязкостью и способностью растворять в себе кварц и каолин [13].

Полевой шпат, обладающий хорошим флюсующим действием, плавится при температуре 1100–1200 °С (благодаря наличию примесей) с образованием прозрачного или молочно-белого стекла.

Температура плавления полевых шпатов повышается с увеличением содержания K_2O (по сравнению с Na_2O), а вместе с тем растет и вязкость расплава. Чистый калиевый полевой шпат плавится полностью при 1530 °С, но природные примеси, преимущественно альбита, понижают его температуру плавления до 1070–1200 °С. Калиевый полевой шпат дает очень вязкое стекло, плавление его идет постепенно. Состав калиевого полевого шпата по сравнению с другими более или менее постоянен, что позволяет считать его наиболее ценным полевошпатовым сырьем для керамической промышленности.

Альбит хотя и плавится при более низкой температуре (1100 °С), чем ортоклаз, но ввиду того, что дает менее вязкое стекло, его использование в керамике ограничено.

В табл. 2.3, 2.4 представлены химический состав и основные свойства полевошпатового сырья различных месторождений, которые использовались в производстве керамических связок для абразивного инструмента. При этом необходимо отметить, что качественный состав материалов различных месторождений отли-

Таблица 2.2

Состав и свойства чистых полевых шпатов

Полевой шпат	Минералогическое название	Химический состав, %					Формула	Плотность, г/см^3	$\alpha \cdot 10^{-7}$, K^{-1}
		SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO			
Калиевый	Ортоклаз, микроклин	64,75	18,32	16,93	–	–	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	2,55	287
Натриевый	Альбит	68,82	19,56	–	11,82	–	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	2,62	270
Кальциевый	Анортит	43,16	36,70	–	–	20,14	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	2,76	270

Таблица 2.3

Химический состав полевошпатового сырья

Наименование месторождения	Массовая доля, %									Калиевый модуль K_2O/Na_2O	Страна месторождения
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.		
Полевой шпат Белогорского месторождения	64,80	19,60	–	0,06	0,08	0,24	11,12	3,5	0,54	3,18	Казахстан
Полевой шпат Мамского месторождения	65,80–67,60	18,10–19,50	–	0,10–0,22	0,28–0,65	0,10–0,25	9,0–11,50	2,40–4,10	0,20–0,46	2,25–4,80	Россия
Полевой шпат кусковой карельский	62,0–70,4	17,0–21,0	0,0–0,5	0,1–0,4	Не более 0,27	0,74	10,5	2,5	0,5	4,0	Россия
Полевой шпат Малышевского рудоуправления	64,0–70,0	12,0–20,0	0,20–0,40	0,12–0,20	0,5–0,9	0,1–0,4	9,0–11,0	2,3–4,0	0,5	3,2	Россия
Полевой шпат чупинский	67,2	17,6	–	0,46	0,30	0,35	11,0	2,5	0,3	4,4	Россия
Микроклин кусковой	66,40	18,32	–	0,12	0,17	0,12	12,12	2,12	10,28	5,7	Россия
Концентрат полевошпатовый Вышневогорского месторождения	63,0–70,0	21,0–74,0	0,53	0,38	0,87	0,21	4,70	7,0	0,72	0,7	Россия
Перлит Арагацкого месторождения	70,0–77,0	13,0–15,18	–	0,74–0,78	0,65	0,16	2,35–3,80	3,43–3,80	2,85	0,7–1,0	Армения
Обсидиан Артенинского месторождения	71,5–77,0	12,0–14,0	–	0,35–1,0	Следы	Следы	3,86–4,90	3,48–4,00	0,3–2,7	0,7–1,0	Армения

Основные свойства полевошпатового сырья

Наименование месторождения	Минералогический состав, %				Температура плавления, °С
	Калиевый шпат	Натриевый шпат	Кальциевый шпат	Кварц	
Полевой шпат Белогорского месторождения	66,0	32,0	–	8,0	1250 1280
Полевой шпат Мамского месторождения	63–68	22,0–37,0	1 3	6–8	1250 1300
Полевой шпат кусковой карельский	54,3	30,7	5,0	5,8 10,0	1240 1250
Полевой шпат Малышевского рудоуправления	55,0	22,0–30,0	1–3	6,0–10,0	1250–1280
Полевой шпат чупинский	55,0–60,0	25–30	1–5	6,2 10,0	1250 1280
Микроклин кусковой	75,6	18,9	3,6	0,54–2,0	1250–1300
Концентрат полевошпатовый Вышневогорского месторождения	30,0	50,0	5,0	–	1200
Перлит Арагацкого месторождения	Вулканическое стекло				1250–1300
Обсидиан Артенииского месторождения	Вулканическое стекло				1250–1300

чается в широких пределах, что сказывается на шихтовом составе керамических связок, за исключением полевого шпата Мамского месторождения.

На рис. 2.1 показаны виды огневых проб полевошпатового сырья различных месторождений. Как видно из рис. 2.1, полевые шпаты имеют различную температуру плавления: более легкоплавкий полевой шпат — месторождения Куру-Ваара *6*, более тугоплавкий — дубровинский полевой шпат *1*.

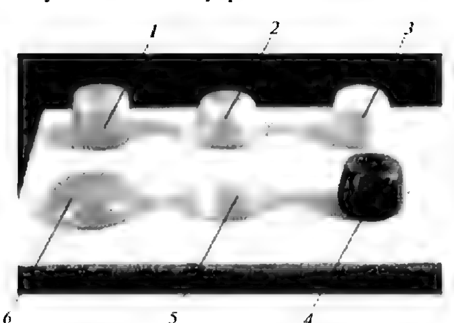


Рис. 2.1. Вид огневых проб полевых шпатов различных месторождений, обожженных при температуре 1250 °С:

1 – Дубровинское; *2* – Белогорское; *3* — Мамское; *4* – перлит Арагацкого месторождения; *5* – Кара-откельское; *6* – Куру-Ваара

На рис. 2.2 представлены комплексные термограммы полевошпатового сырья: мамского полевого шпата с калиевым модулем 5,8, чалгановского полевошпатового концентрата с калиевым модулем 18,3 и трахита с калиевым модулем 12,3. Несмотря на различный химический состав полевошпатовых материалов, термограммы близки между собой.

В табл. 2.5 и 2.6 даны химический состав и основные свойства полевошпатового сырья, которое было исследовано специалистами ВНИИАШа (руководители работ С.Г. Воронов, В.А. Курнукин, С.М. Федотова) и абразивными заводами в качестве заменителя полевого шпата. Необходимо отметить, что из 129 месторождений полевошпатового сырья, находящихся на территории России и в странах СНГ, в настоящее время эксплуатируется примерно 40 месторождений. Самое крупное месторождение полевого шпата — это Мамское месторождение (Россия) [14].

Для отечественной керамической промышленности полевошпатовое сырье добывается в Северо-Западном экономическом районе (35,8 %), Дальневосточном экономическом районе (11,9 %), на Урале (2,1 %) и в Восточно-Сибирском экономическом районе.

Пегматиты. Заменителями полевого шпата являются пегматиты и граниты. Пегматиты как последние дериваты гранитной магмы содержат в кристаллической решетке породообразующих минералов минимальное количество оксида углерода СО. Основным преимуществом гранитных пегматитов является хорошая обогатимость, высокое качество получаемых в результате обогащения концентратов и их конкурентоспособность на мировом рынке.

Наиболее важные месторождения гранитных пегматитов — Куру-Ваара, Отрадное, Уракко-Озеро, Лупикко, Кюрьяля, Линна Вара (Россия), Елисеевское, Балка Большого Лагеря (Украина), Восточно-Казахстанская группа месторождений керамических пегматитов (Казахстан).

Пегматиты по качеству разделены на два промышленных типа: микроклиновый (14,7 %) и плагиоклазовый (85,3 %). Микроклиновый пегматит после обогащения пригоден для использования в керамической и абразивной промышленности, плагиоклазовый — в стекольной.

Минералогический состав пегматитов различных месторождений, мас. %: микроклин — 26–28; плагиоклаз — 30–38; кварц — 30–32. Основные примеси — мусковит, магнетит, ортит, пирит, кальцит, циркон и др.

Обогащение пегматитов методами флотации, сухой магнитной сепарации, электрической сепарации и др. (разработки Гипрониинеметаллруда, Ленинград, Уралмеханобра) обеспечивает получение калиевого полевого шпата по ГОСТ 7030–75 марки ПШМ 0,2-2 (выход 20–24 %), кварцево-полевошпатового концентрата (выход 39–41,5 %), кварцевого продукта (выход 4,6–10 %).

Микроклины Восточно-казахстанской группы по химическому составу удовлетворяют требованиям ГОСТ 7030–75, но имеют специфические особенности: сплавы при обжиге непрозрачны, имеют молочно-белый цвет, "мелкопузырчатую" структуру. При обжиге в окислительной среде происходит выделение азота, что ведет к образованию пузырей и вспучиванию расплава полевого шпата.

Коэффициент линейного расширения пегматитов Восточно-Казахстанской группы более высокий, чем у полевых шпатов Карело-Кольского региона.

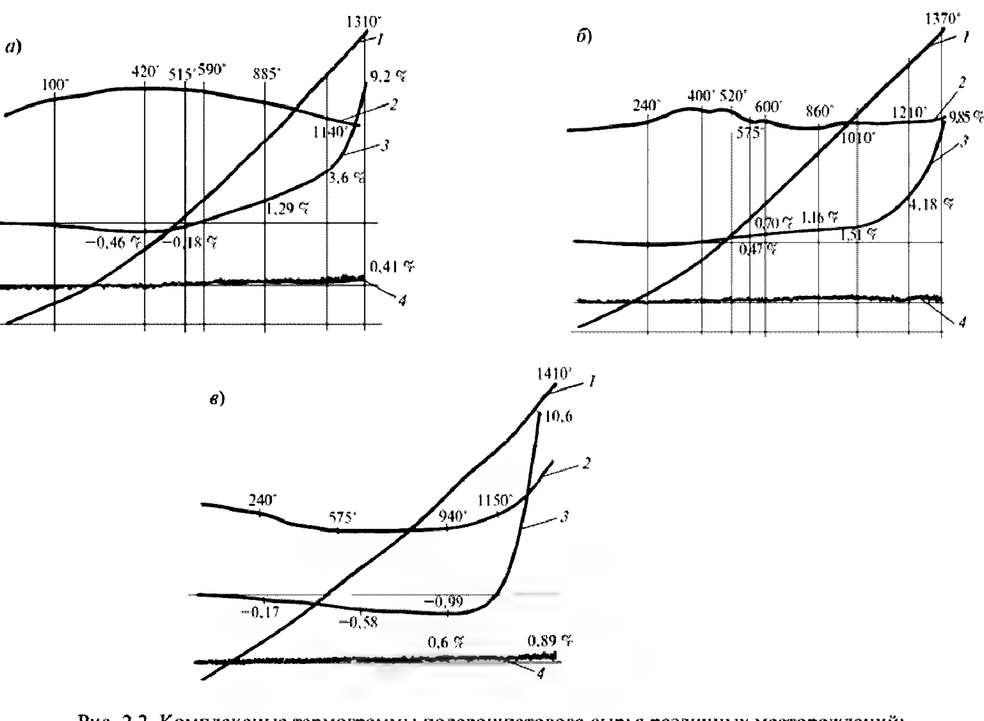


Рис. 2.2. Комплексные термограммы полевошпатового сырья различных месторождений:

а — Мамский полевой шпат; *б* — чалгановский полевошпатовый концентрат; *в* — цехисубанский обогащенный трахит; *1* — температурная кривая нагревания; *2* — дифференцированная температурная кривая; *3* — дилатометрическая кривая; *4* — кривая изменения массы

Таблица 2.5

Химический состав полевошпатового сырья, исследованного и рекомендованного для производства кермических связок

Наименование месторождения	Массовая доля, %									Калиевый модуль K_2O/Na_2O	Страна месторождения
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.		
Концентрат полевошпатовый Дубровинского месторождения	65,5	17,65	–	0,14	0,22	–	12,30	2,10	1,09	5,8	Украина
Концентрат микроклиновый Адуйского месторождения	64,50–66,80	18,74–21,29	–	0,04–0,06	0,11–0,17	0,02–0,08	9,37–11,12	2,62–4,50	0,21–0,27	2,1–4,3	Россия
Концентрат полевошпатовый Карооткельского месторождения	67,65	20,30	–	0,50	1,14	0,02	6,75	3,25	0,39	2,1	Казахстан
Концентрат Огневской фабрики № 7	74,40	15,11	–	0,04	0,22	0,02	2,0	6,75	0,29	0,3	Россия
Концентрат полевошпатовый из пегматитов центрального участка месторождения Куру-Ваара	65,4	19,12	–	0,20	1,30	0,10	8,0	4,0	0,29	2,0	Россия
Натриево-полевошпатовый концентрат Белогорского месторождения	69,0	17,73	–	0,07	0,45	–	4,2	8,06	0,49	0,52	Казахстан
Концентрат полевошпатовый Чалгановского месторождения	65,3	18,63	0,36	0,32	0,20	0,20	12,8	0,7	1,47	18,3	Россия
Трахит обогащенный Цихисубанского месторождения	66,0	17,9	0,32	0,20	0,5	0,5	12,0	0,9	1,5	13,3	Грузия
Полевошпатовый концентрат Екатерининского месторождения	63,8	19,4	0,05	0,15	0,25	0,25	14,4	0,6	0,7	24,0	Украина
Концентрат полевошпатовый Беляевского месторождения	66,0	16,4	0,05	0,1	0,05	0,05	14,4	0,2	0,5	72,0	Украина
Ортофир Балки Вербовой Донецкой области	63,94–66,06	18,60–20,23	–	0,29–0,61	Следы – 0,84	Следы – 0,06	11,48–13,90	0,29–1,40	0,4–0,75	11–12	Украина
Пегматит Чтинского месторождения	77,02	13,50	0,1	0,32	0,39	0,10	3,5	4,60	0,56	0,76	Россия
Перлит Мухор-Талинского месторождения	68,76–75,50	15,27	–	0,08–1,48	0,80–2,88	0,10–1,45	3,82–5,0	2,72–5,0	5,9–6,9	0,5–1,0	Россия

Таблица 2.6

Основные свойства полевошпатового сырья, исследованного и рекомендованного для производства керамических связок

Наименование месторождения	Минералогический состав, %				Температура плавления, °C
	Калиевый шпат	Натриевый шпат	Кальциевый шпат	Кварц	
Концентрат полевошпатовый Дубровинского месторождения	73	20	1	6	1230–1280
Концентрат микроклиновый Адуйского месторождения	56–66	24–42	0,5	0,5–9	1280–1300
Концентрат полевошпатовый Карооткельского месторождения	40	30	5	16	1280
Концентрат Огневской фабрики № 7	12	62	1	25	1250
Концентрат полевошпатовый из пегматитов центрального участка месторождения Куру-Ваара	47	37	6,5	6–9	1280
Натриево-полевошпатовый концентрат Белогорского месторождения	30	50	5	2	1160
Концентрат полевошпатовый Чалгановского месторождения	54,3	30,3	0,5	6	1270
Трахит обогащенный Цихисубанского месторождения	85–86	5–7	–	8,5	1250–1300
Полевошпатовый концентрат Екатерининского месторождения	53	42	1,0	4	1260–1280
Концентрат полевошпатовый Беляевского месторождения	67–68	24–32	0,5	3	1260–1280
Ортофир Балки Вербовой Донецкой области	56–65	23–41	0,5	0,5–10	1280–1300
Пегматит Читинского месторождения	21	43	1,5	25–30	1300
Перлит Мухор-Талинского месторождения	Вулканическое стекло				1250–1280

Предельное количество кварца в пегматите, при котором последний еще пригоден для применения в качестве плавня, составляет до 30 %. Однако последние сорок лет пегматиты в производстве абразивного инструмента не использовались. Наличие большого количества кварца (до 30 %) приводит к уменьшению прочностных свойств инструмента, а также к браку — трещинам крупногабаритного инструмента из-за модификационных превращений кварца в процессе его нагревания, связанного с изменением объема. Однако при современных методах измельчения (фракции 5 мкм до 80 %), при отработке режимов обжига и рецептуре круга возможно использование определенных месторождений пегматита (желательно все-таки с применением обогащения).

Нефелин. Нефелин имеет переменный состав и встречается в природе в виде нефелинового сиенита, мариуполита и др. Нефелиновый сиенит (алюмосиликат натрия) является заменителем полевого шпата в керамических смесях. Он представляет собой горную породу, содержащую в основном три минерала: нефелин $Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2Si_2O$ в количестве до 30 %, альбит $Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2Si_2O$ и микроклин $K_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6Si_2O$ в количестве до 68 %. Твердость нефелина — 5–6 по Моосу, плотность — 2,58–2,64 г/см^3, температура плавления — около 1200 °С. Содержание щелочей в нефелине составляет 20–30 %.

Наиболее крупные месторождения нефелиновых сиенитов находятся в Красноярском крае (Средне-Татарское), на Урале (Вышневогорское) и на Украине (Мариупольское).

Нефелиновые сиениты содержат в своем составе повышенное содержание железа (до 5 %), поэтому при производстве керамических связок используют полевошпатовые концентраты (например, Вышневогорского месторождения, табл. 2.3).

В табл. 2.7 представлены требования по ГОСТ 7030–75 к качеству полевых шпатов и пегматитов для тонкой керамики, которыми пользуется и абразивная промышленность.

Щелочные каолины. Щелочные каолины представляют собой промежуточный продукт природного процесса выветривания горных пород кварц-полевошпатового состава (гранитов, гнейсов, пегматитов, аркозовых песчаников и др.).

Щелочные каолины в естественном состоянии (каолин-сырец) характеризуются крайне непостоянным минеральным и гранулометрическим составом. Минеральный состав щелочного каолина-сырца представлен смесью трех-четырех минералов: каолинита (30–50 %), кварца (30–40 %), калиевого шпата (30–40 %) и гидромусковита (10–15 %) [15].

Характерной особенностью щелочных каолинов является наличие в них полевого шпата с высоким содержанием K_2O и гидрослюды. Калиевый модуль (K_2O + Na_2O) в щелочных каолинах, как правило, колеблется в пределах 5–20, и в этом отношении щелочные каолины представляют собой уникальное сырье для получения высококалиевых полевошпатовых концентратов.

В табл. 2.8 приведен химический состав щелочных каолинов различных месторождений [16].

Как видно из табл. 2.8, щелочной каолин-сырец характеризуется переменным химическим составом и может рассматриваться в качестве комплексного исходного сырья для получения каолинитового, полевошпатового и кварцевого концентратов. Из указанных в табл. 2.8 месторождений эксплуатируется

Таблица 2.7

Требования по ГОСТ 7030–75 к качеству полевых шпатов и пегматитов для тонкой керамики (полевошпатовые материалы)

Показатель	Норма для марки				
	ПШМ 0,15-3; ПШК 0,15-3	ПШМ 0,20-3,0; ПШК 0,20-3	ПШМ 0,20-2; ПШК 0,20-2	ПШМ 0,30-3; ПШК 0,30-3	ПШМ 0,30-2; ПШК 0,30-2
Массовая доля оксида железа Fe_2O_3, %, не более	0,15	0,2	0,2	0,3	0,3
Массовая доля суммы оксидов щелочных металлов (K_2O + Na_2O), %, не более	12	12	11	11	11
Массовая доля суммы оксидов кальция и магния (CaO + MgO), %, не более	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Соотношение оксидов щелочных металлов K_2O : Na_2O по массе, не менее	3	3	3	3	3
Массовая доля кварца, %, не более	8	8	8	8	8
Потери массы при прокаливании, %, не более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Содержание слюды чешуек на 100 зерен материала	2	2	2	2	2
Качество спека после обжига при температуре 1350–1370 °С	Чистый без мушек				

Таблица 2.8

Химический состав щелочных каолинов

Месторождение (страна)	Химический состав, мас. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	п.п.п.
Просяновское месторождение (Украина, Днепропетровская область)	67,4–73,49	16,65–22,71	0,12–0,95	0,15–0,53	0,12–0,65	0,1–0,2	1,37–5,9	0,05–0,77	0,02–0,16	5,39
Екатериновское месторождение (Украина, Донецкая область)	67–76	15,5–21,5	0,25–1,9	0,05–0,60	0,25–1,1	0,05–0,45	1,5–8,0	0,15–1,4	–	3,7–7,5
Дубровское месторождение (Украина, Житомирская область)	64,11–81,76	11,24–27,91	0,01–2,44	0,01–0,92	0,01–1,2	0,01–0,96	0,77–7,8	0,02–3,07	0,01–0,49	1,11–8,86
Беляевское месторождение (Украина, Запорожская область)	70,98	19,27	0,28	0,12	0,37	0,21	3,72	0,32	0,06	4,83
Чалгановское месторождение (Россия, Амурская область)	78,1	13,5	0,32	0,27	0,3	0,21	6,5	1,05	–	4,05

в настоящее время только Дубровское месторождение (Украина), на котором действует обогатительная фабрика, принадлежащая барановскому объединению "Фарфор".

Работами института "Уралмеханобр" выявлена принципиальная возможность получения кондиционных каолиновых, полевошпатовых и кварцевых концентратов из щелочных каолинов Просяновского, Дубровского и других месторождений путем обогащения по схеме: избирательное измельчение — флотация — электромагнитная сепарация.

В табл. 2.9 представлена качественная характеристика продуктов обогащения щелочных каолинов и керамических трахитов.

Работами [17] было показано, что при сухой схеме обогащения щелочных каолинов, используя разную измельчаемость кварца и микроклина (разрушающая нагрузка на зерно кварца размером 1000–1250 мкм составляет 2640–4050 г/зерно, для микроклина — 290–570 г/зерно), можно также получать полевошпатовые концентраты для использования их в производстве керамических связок.

В табл. 2.10 представлены выход и качественная характеристика избирательного измельчения песков из щелочных каолинов Дубровского месторождения.

Трахиты. По составу и свойствам полевошпатового компонента к щелочным каолинам приближаются некоторые гидротермальные измененные эффузивные породы, например трахиты Цихис-Убанского участка Асканского месторождения бентонических глин (Грузия).

Так же как и в щелочных каолинах, полевой шпат в трахитах представлен реликтовым продуктом природного процесса выщелачивания натрия из первичного полевошпатового материала.

Трахиты — это тонкокристаллическая порода с интерсертальной структурой основной массы. Минералогический состав обеих разновидностей примерно одинаков: 52–65 % калиевого полевого шпата, 5–7 % альбита, 5–10 % вулканического стекла, 15–20 % кварца, 10–15 % серицита, крупнообломочные трахиты содержат 3–5 % пирита. Средний химический состав породы, мас. %: SiO_2 62,6, Al_2O_3 18,5, Fe_2O_3 2,3, TiO_2 0,34, MnO 0,3, (CaO + MgO) 1,4, K_2O 12,4, Na_2O 1, P_2O_5 0,1, п. п. п. 1,26.

Технология обогащения трахитов разработана Кавказским институтом минерального сырья и включает обработку серной кислотой. Крупнообломочные трахиты предварительно флотируются в целях удаления пирита [18].

Исследованиями установлено, что для получения концентрата с содержанием 0,2–0,3 % оксида железа достаточна обработка 10 %-ной H_2SO_4, а с содержанием 0,15–0,2 % оксида железа — 15 %-ной H_2SO_4. Содержание диоксида титана при обогащении не снижается.

Качество обогащенного трахита соответствует следующим показателям:

массовая доля суммы оксидов калия и натрия (K_2O + Na_2O), не менее — 12,0 %;

калиевый модуль K_2O/Na_2O — 13,0;

отношение массовой доли оксида калия к массовой доле оксида натрия K_2O : Na_2O — не менее 5,0;

массовая доля оксида кремния SiO_2 — не более 68,0 %;

Таблица 2.9

Качественная характеристика продуктов обогащения щелочных каолинов и керамических трахитов

Наименование месторождения	Продукт	Выход, %	Химический состав, мас. %								K_2O/Na_2O	Кварц, %
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO + MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.		
Чалгановское	Исходный	100	75,1	17,1	0,5	0,4	0,2	3,5	0,4	4,5	9	50
	Каолиновый концентрат	30	52,5	32,5	0,8	0,3	0,3	2,1	0,2	10,0	–	–
	Полевошпатовый концентрат	8	67,5	18,1	0,3	0,2	0,6	12,5	0,8	0,3	16	9
Дубровское	Исходный	100	74,2	16,5	0,6	0,3	0,5	4,1	0,7	5,7	6	45
	Каолиновый концентрат	30	49,1	35,0	1,0	0,5	0,3	1,7	0,3	11,9	–	–
	Полевошпатовый концентрат	14	72,9	14,7	0,1	0,2	0,2	11,2	0,9	0,6	12	25
Екатериновское	Исходный	100	72,5	17,3	0,6	0,3	0,6	5,1	0,4	3,5	13	37
	Каолиновый концентрат	25	50,0	34,1	1,2	0,6	0,3	1,3	0,2	12,1	–	–
	Полевошпатовый концентрат	12	63,8	19,4	0,15	0,05	0,5	14,4	0,6	0,7	24	4
Беляевское	Исходный	100	72,1	18,7	0,8	0,9	0,6	3,5	0,4	4,9	9	40
	Каолиновый концентрат	35	49,2	36,0	0,6	0,2	0,7	1,3	0,1	14,5	–	–
	Полевошпатовый концентрат	10	66,0	16,4	0,1	0,05	0,1	14,4	0,2	0,5	12	3
Просяновское	Исходный	100	71,4	19,2	0,4	0,3	0,6	3,0	0,2	5,2	15	22
	Каолиновый концентрат	25	50,5	35,0	0,4	0,2	0,4	1,0	0,2	12,3	–	–
	Полевошпатовый концентрат	8	65,5	17,65	0,14	–	0,22	12,13	2,10	1,09	5,8	–
Трахиты Цихис-Убанского месторождения	Исходный	100	66,0	20,0	2,4	0,4	0,5	11,5	0,6	1,2	19	12
	Полевошпатовый концентрат	65	67,0	18,5	0,13	0,2	0,5	12,0	0,8	1,1	15	9

Таблица 2.10

Выход и качественная характеристика избирательного измельчения песков из щелочных каолинов Дубровского месторождения

Продукт	Крупность продукта, мм	Выход, %	Химический состав, мас. %									Минералы, %		
			SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.	Микроклин	Кварц	Мусковит
Исходные пески	-8,0	100,0	86,3	6,6	0,41	0,30	0,31	0,20	5,1	0,44	0,3	32,0	62,0	6,0
Концентрат	-0,16	21,0	69,0	17,7	0,20	0,74	0,37	0,19	9,6	0,90	1,2	78,0	16,0	6,0
Отвальный продукт	+0,16	79,0	91,0	3,6	0,46	0,20	0,30	0,20	3,9	0,32	0,1	20,0	74,0	6,0

массовая доля оксида железа Fe_2O_3 — не более 0,5 %;

массовая доля остатка на сетке № 0063 — не более 1,0 %;

массовая доля влаги — не более 1,0 %.

Минералогический состав обогащенного трахита, исследованный петрографическим методом полевой шпат — 83,9 %, кварц — 8,5 %, слюда — 1,2 %, прочие — 1,2 %.

Перлит и обсидиан. Перлит и обсидиан являются вулканическими стеклами, они близки по химическому составу и могут применяться вместо полевых шпатов. Их основное отличие друг от друга состоит в том, что обсидиан представляет собой плотную стеклообразную породу щелочно-алюмосиликатного состава, практически лишенную пористости и кристаллических включений, а перлит отличается высокой пористостью (до 40—50 %) и наличием в его составе до 4—5 % гидратной влаги. Перлиты имеют разную окраску (серую, черную, бурую, красную и т. д.); излом раковистый. Удельный вес перлитов 2,23—2,40 г/см^3, твердость по шкале Мооса 5,5—5,7 [19].

В пересчете на прокаленное вещество перлит и обсидиан содержат, %: SiO_2 70—74, Al_2O_3 14—16, K_2O 3,5—4,5, Na_2O 3,5—4,5, Fe_2O_3 0,5—1,0. Крупные месторождения перлитов и обсидианов с запасами более 70 млн. т расположены на территории Армении. Обнаружены также месторождения в Приморье, Бурятии (16336 тыс. т), на Камчатке, в Таджикистане и на Украине (36 млн. м^3). Перлиты Украины являются разновидностями липаритов — кислых продуктов извержения вулканов. Химический состав перлитов и обсидианов некоторых месторождений приведен в табл. 2.11.

Преимущества этих пород перед полевыми шпатами:

достаточно хорошая однородность материала и отсутствие концентрированных железистых включений, дающих мушку;

наличие природной стекловидной структуры, в которой полностью завершены процессы разрушения кристаллической решетки;

большие запасы и удобные для разработки их залегания.

Для перлитов и обсидианов характерен ряд особенностей: относительно высокое содержание щелочей (до 8—9 %), сравнительно небольшие количества

Таблица 2.11

Химический состав перлитов и обсидианов некоторых месторождений, мас. %

Оксид	Месторождение				
	Артенинское (Армения, обсидиан)	Арагатское (Армения, перлит)	Богопольское (Приморский край, перлит)	Мухор-Таменское (Бурятия, перлит)	Ардов-Затышнянское (Западная Украина, перлит)
SiO_2	71,10–75,0	64,5–76,0	71,6–72,6	68,0–70,5	65,0–75,0
Al_2O_3	12,0–14,0	14,6–18,0	12,3–12,6	14,0–15,3	12,0–15,0
Fe_2O_3	0,35–1,0	0,4–1,0	0,5–0,7	0,08–1,48	1,5–2,5
CaO	Следы	1,1–2,5	1,0–1,8	0,80–2,90	1,5–2,5
MgO	Следы	0,2–1,3	0,3–0,7	0,10–1,45	0,1–1,5
K_2O	3,90–4,90	1,06–4,65	0,5–1,9	3,8–5,0	–
Na_2O	3,5–4,00	0,5–4,5	3,0–4,0	2,7–5,0	2,5–7,0
SO_3	0,1	0,1	0,1	–	–
H_2O (связанная)	0,1–0,3	0,1–0,3	0,7–2,3	1,0–2,0	2,0–2,5
п.п.п.	0,3–2,7	0,3–2,7	6,1–6,7	5,9–6,9	2,5–2,7

красящих оксидов железа и титана и "вспучивание" за счет удаления воды при температуре до 1000–1200 °С.

Температурный интервал плавления перлита и обсидиана (от начала стадии размягчения до растекания) лежит в пределах 900–1400 °С, огнеупорность — в пределах 1200–1250 °С. Схема постепенного расплавления перлита представлена на рис. 2.3.

Плавкость определялась на образцах в виде кубиков размером 10 × 10 × 10 мм, выточенных из пород. Нагрев производился в силитовой печи, изменение состояния образцов во время нагрева фиксировалось на световом экране.

В табл. 2.12 представлены результаты анализа огневых проб перлитов при температурах 1060, 1200 и 1320 °С, которые показали, что арагацкий перлит спекается при температуре 1060 °С, а закарпатский начинает спекаться только при 1200 °С; при нагревании до 1320 °С как арагацкий, так и закарпатский перлиты представляют собой стекло.

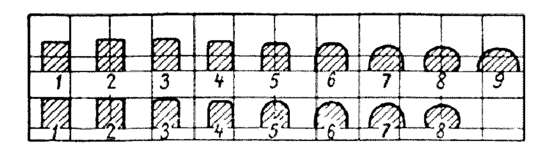


Рис. 2.3. Схема постепенного расплавления перлитов:

а — перлит Закарпатского месторождения: *1* — начальный образец; *2* — удлинение образца при температуре 1085 °С; *3* — образец при 1335 °С (начало плавления); *4* — при 1385 °С; *5* — при 1435 °С; *6* — при 1440 °С; *7* — при 1450 °С; *8* — при 1470 °С; *9* — при 1485 °С; *б* — перлит Арагацкого месторождения: *1* — начальный образец; *2* — удлинение образца при температуре 1028 °С; *3* — при 1315 °С; *4* — при 1330 °С; *5* — при 1345 °С; *6* — при 1350 °С; *7* — при 1355 °С; *8* — при 1370 °С

Таблица 2.12

Характеристика огневых проб перлитов

Месторождение	Характеристика материала при температуре нагрева, °С		
	1060	1200	1320
Закарпатское	Проба слегка спекшаяся, бурого цвета, при физических усилиях структура частично нарушается	Проба слегка спекшаяся, отдельные зерна хорошо оплавлены, некоторые зерна оплавлены слегка	Проба представляет собой стекло серого цвета с единичными железистыми включениями
Арагацкое	Проба плотно спекшаяся, розового цвета, однородная	Проба спекшаяся, хорошо оплавлена, светло-серого цвета	Проба представляет собой стекло светло-серого цвета, без видимых включений

Таблица 2.13

Минералогический состав перлитов после обжига

Месторождение	Температура обжига, °С	Состав по объему, %									Показатель преломления основной массы
		Стекло	Полевой шпат	Кварц	Глинистые частицы	Гидроокись железа	Выплавки	Газовые пузыри	Рутил	Рудные примеси	
Закарпатское	1060	96,5	1	–	1–1,5	1	–	–	Следы		1,495–1,498
	1320	93,3	–	–	–	–	0,5	6	–	–	1,483–1,492
Арагацкое	1060	91	Следы	1	–	–	–	–	–	–	1,434
	1320	94	–	–	–	–	–	6	–	–	1,483

Минералогический состав перлитов после обжига при температурах 1060 и 1320 °С приведен в табл. 2.13.

Основная масса закарпатского перлита после обжига при 1060 °С представляет собой стекло с включениями микролитов рутила и полевых шпатов, содержащихся в небольшом количестве.

После обжига при 1320 °С структура перлита стекловидная, участками перлитовая (стекло с концентрическими трещинами, идущими по шаровым поверхностям) с красно-бурыми выделениями гидроксидов железа и точечными вкраплениями черного вещества (очевидно, выплавки железа вокруг газовых пузырьков). Преобладающий размер зерен 100–200 мкм в диаметре. Газовые пузырьки округлой формы размером от 10 до 500 мкм в диаметре. Выплавки железа наблюдаются участками в стекле, а иногда вокруг отдельных газовых пузырьков обнаруживаются вторичные глиноземистые участки с мелкими иголочками муллита в виде шагрени.

Структура арагацкого перлита, обожженного при температуре 1060 °С, стекловатая, основную массу в породе составляет стекло. В небольшом количестве наблюдается кварц в виде зерен изометрической формы размером от 10 до 60 мкм. Основная масса перлита, обожженного до 1320 °С, — чистое стекло. Показатель преломления 1,483±0,001. Преобладающий диаметр зерен 80–100 мкм. Газовые пузырьки строго округлой формы диаметром от 10 до 240 мкм.

2.1.2. Фритты (стекла) и технология их изготовления

Введение фритт стекол (процесс введения сваренного стекла в холодную воду называется фриттованием) в состав керамических связок обусловливается необходимостью повышения прочности абразивного инструмента. Кроме того, при ее введении снижается огнеупорность связки, и тем самым создаются условия для начала взаимодействия абразивного зерна со связкой при более низкой температуре.

В табл. 2.14 представлен химический состав фритт, используемых в настоящее время в промышленности, а также стекол и фритт, которые можно рекомендовать при разработке связок, либо для определенных марок абразивного материала, либо для разработки специального инструмента.

В табл. 2.15 представлен химический состав фритт зарубежных фирм из анализа патентной литературы. Как видно из табл. 2.14 и 2.15, в производстве абразивного инструмента на керамической связке, как в отечественной, так и в зарубежной практике, применяется большое разнообразие фритт различного химического состава.

В табл. 2.16 приведены результаты исследования стекол на базе методических и конструкторских разработок лаборатории физико-химических свойств стекла Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН [20]. Сравнение данных по тепловому расширению показывает, что в области температур T_g наименьший температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) имеет стекло № 1, а наибольший — стекло № 3; при температурах выше T_g наиболее интенсивно расширяется стекло № 2.

Вязкость η стекол существенно зависит от температуры и изменяется в широких пределах. В низкотемпературной области (ниже 600 °С) наименьшей вязкостью обладает стекло № 3, однако при 1200 °С его вязкость достигает той

Таблица 2.14

Химический состав фритт (стекол)

Исследуемое стекло	Химический состав, мас. %												
	SiO_2	B_2O_3, не менее	BaO, не менее	Al_2O_3	Li_2O	Na_2O	K_2O	MgO, не более	CaO, не более	Fe_2O_3, не более	Fe	п.п.п., не более	Примеси, не более
Фритта боросиликатная (стекло № 1)	59,0±1,0	17,0	–	3,0±0,7	–	4,0±0,5	4,0±0,5	0,8	1,0	0,2	–	–	–
Фритта борлитийсиликатная (стекло № 2	66,0±2,0	17,0±1,0	–	3,0±1,0	4,5±0,5	4,0±0,5	3,5±0,5	1,0±0,5	1,0	0,2	–	–	–
Стекло бариевое (стекло № 3)	63,0–69,0	–	12,0	4,0–6,0	6,0–8,0	6,0–8,0	6,0–8,0	–	–	–	0,5–0,8	1,0	1,0
Фритта борокальциевая	40,0±2	24,0±1,0	–	14±1,0	–	6,0±0,5	3,0±0,5	10±0,5	12±1,0	0,2	–	1,0	1,0
Фритта боросиликатная (стекло № 5)	68,0	19,0	–	2,0	–	5,0	4,0	0,5	1,0	0,4	–	–	–

Таблица 2.15

Химический состав фритт зарубежных фирм

Назначение фритты	Состав фритт, мас. %												Примечание
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	ZnO	MgO	MnO	Li_2O	Fe_2O_3	BaO	
Для абразивного инструмента из электрокорунда	38,8	15,0	24,5	6,7	2,9	12,1	–	–	–	–	–	–	Фирма "Джи энд Би" (лицензия), Канада
Для высокопористого абразивного инструмента	57,2	11,5	13,3	5,1	2,2	6,3	4,4	–	–	–	–	–	То же
Для твердых мелкозернистых кругов из карбида кремния	67,0	–	–	10,4	–	6,3	–	4,5	11,8	–	–	–	"

Окончание табл. 2.15

Назначение фритты	Состав фритт, мас. %												Примечание
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	ZnO	MgO	MnO	Li_2O	Fe_2O_3	BaO	
Низкотемпературная фритта для карбида кремния зернистостью М28–М5 и для крупногабаритных кругов зернистостью М28–М5	59,0	3,0	25,0	2,0	2,0	–	4,0	4,0	–	1,0	–	–	"
Для абразивного инструмента из электрокорундовых материалов													
Фритта 1	48,70	9,00	27,2	10,2	2,7	0,9	–	0,5	–	–	0,53	–	Фирма Carborundum Elektrite (Чехия)
Фритта 2	67,8	4,6	3,0	7,3	6,0	–	–	0,5	–	–	0,7	0,1	То же
Фритта 3	63,2	5,6	5,0	7,5	–	–	–	0,5	–	–	0,7	10,3	"
Фритта ПС 5430	54,2	0,9	28,7	5,1	0,1	3,8	–	0,2	–	–	0,20	–	Фирма Norton (США)
Фритта С 5553	59,0	8,6	20	5	4	2,5	–	0,5	–	–	0,20	–	То же
Фритта производства Германии	59–61	13–15	7–8	3–9	1–2	2–3	–	1–2	–	2,0–2,5	1–2	–	А. с. 231141-8, опубл. 25.06.81

Таблица 2.16

Физико-механические и химические свойства исследованных стекол

Стекло	$\alpha_{20\text{-}300}\cdot 10^2$, K^{-1}	$\alpha_m\cdot 10,7$, K^{-1}	$\alpha_e\cdot 10$, K^{-1}	T_g, °C	T_g^+, °C	T_{14}, °C	T_5, C	$E\cdot 10^{-10}$, Н/м^2	$\sigma_и\cdot 10^{7}$, Н/м^2	$H_\mu\cdot 10^{7}$, Н/м^2
Фритта боросиликатная (№ 1)	47,2±0,6	50,4±0,5	229±3,0	511±1,5	525,0±1,0	512,5±1,0	956±6,0	6,75±0,1	7,5±0,5	484±10
Фритта борлитийсиликатная (№ 2)	64,3±0,8	77,2±0,6	468±6,0	486,5±1,5	494,0±1,0	481,5±1,0	808±6,0	8,35±0,1	9,4±0,6	540±10
Бариевое (№ 3)	90,4±1,3	104,6±0,8	285±3,0	444,0±1,5	455,0±1,0	448,5±1,0	890±6,0	7,04±0,1	7,3±0,5	505±10

Примечание. T_{14} и T_5 обозначают температуры, при которых вязкость стекол составляет 10^{14} и 10^5 соответственно; α_m – мгновенное значение КТЛР; α_e — равновесное значение КТЛР; T_g и T_g^+ — температуры стеклования; E — модуль упругости; $\sigma_и$ — механическая прочность; H — микротвердость.

же величины, что и стекло № 1; в то же время стекло № 2 в области высоких температур оказывается наиболее легкоплавким (рис. 2.4).

По значениям модуля упругости, механической прочности и микротвердости стекла № 1 и 3 различаются незначительно, но для стекла № 2 их значения на 10–30 % выше.

Технологический процесс варки фритт состоит из ряда последовательных операций:

переработка сырьевых материалов (сушка, просев, дробление и пр.);

приготовление шихты (расчет шихты по процентному содержанию оксидов в сырьевых материалах, взвешивание компонентов, смешивание компонентов, транспортирование);

варка стекла (загрузка печи шихтой, варка стекла в горшковой или ванной печах, контроль и регулирование технологических параметров процесса варки: температурный режим, давление в печи, соотношение газ—воздух, расход газа и др.);

грануляция стекла (фриттование).

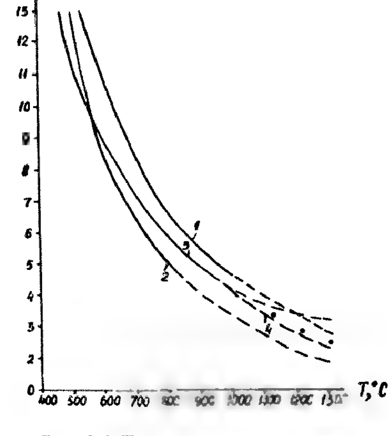


Рис. 2.4. Температурные зависимости вязкости стекол:
——— — эксперимент; - - - - - - — экстраполяция; •— — эталонное значение: 1 — боросиликатная фритта (стекло № 1); 2 — борлитийсиликатная фритта (стекло № 2); 3 — бариевое стекло (стекло № 3); 4 — эталонное стекло К-15

Расчет шихты производят на основании результатов анализа химического состава применяемых сырьевых материалов и с учетом потерь при варке стекла [21]. Характеристика сырьевых материалов для варки фритт представлена в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Характеристика сырьевых материалов, используемых для получения фритты

Вводимый оксид	Требования к сырью	Месторождение
SiO_2	Песок по ГОСТ 22551-78: SiO_2 – 83,5–99,7 %, примеси, в том числе Fe_2O_3 (0,05–0,02 %), TiO_2 (0,04–0,01 %). Влажность обогащенного песка не должна превышать 0,5 % по массе: по SiO_2 – ±0,15...±0,5 %; по Al_2O_3 – ±0,05...±0,5 %. Крупность песка в обогащенном виде – не более 0,1–0,4 мм, пылевидных частиц менее 0,1 мм – не более 5 %	Ташлинское, Егановское, Авдеевское, Новоселовское
B_2O_3	Борная кислота H_3BO_3 по ГОСТ 18704-78: B_2O_3 56,45 % и H_2O 43,55 %. Бура $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ по ГОСТ 8429-77 B_2O_3 36,65 %, Na_2O 16,2 % и H_2O 47,15 %. Кальцинированная бура: содержание $Na_2B_4O_7$ – не менее 49,5 %, нерастворимый в воде остаток не более 0,3 %	–

Вводимый оксид	Требования к сырью	Месторождение
Al_2O_3	Технический оксид алюминия по ГОСТ 6912–74, гидроксид алюминия $Al_2O_3 \cdot H_2O$, полевые шпаты по ГОСТ 7030–75, по ТУ 31-25-158–75, каолины по ГОСТ 21286–82: каолин обогащенный, отходы горно-обогатительных фабрик полевошпатового и нефелинового концентратов	Белогорское, Мамское, Чупинское
CaO	Известняк: содержание CaO – не менее 53 %, Fe_2O_3 – не более 0,2 %. Мел: содержание CaO – не менее 98 %. Мрамор: содержание $CaCO_3$ – 99–99,5 %, содержание Fe_2O_3 – до 0,015 %, но не более 0,2 %	–
MgO	Доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$: 54,3 % $CaCO_3$ и 45,7 % $MgCO_3$. Магнезит $MgCO_3$ в расплав вносит 47,8 % MgO	–
BaO	Применение сульфата бария (барита) $BaSO_4$ ограничено вследствие трудности разложения без восстановителей. При повышении концентрации в шихте (более 5 %) добавляют восстановитель (4–7 %). В стекло переходит 65,6 % BaO. Нитрат бария $Ba(NO_3)_2$ и искусственный $BaCO_3$ – в стекло переходит 77,7 % BaO	–
MnO	Минерал пиролюзит по ГОСТ 4470–79: содержание до 90 % MnO_2. Марганцовокислый калий $KMnO_4$ по ГОСТ 20490–75	–
Na_2O	Кальцинированная сода Na_2CO_3 по ГОСТ 5100–85: содержание 58,5 % Na_2O и 41,5 % CaO. Кристаллическая сода $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$. Сульфат натрия Na_2SO_4: содержание 43,7 % Na_2O и 56,3 % SO_2	–
K_2O	Кальцинированный поташ K_2CO_3 по ГОСТ: 68,2 % K_2O и 31,8 % CO_2. Кристаллический поташ $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$. Содовопоташная смесь – побочный продукт при переработке нефелинового концентрата: содержание $K_2CO_3 + Na_2CO_3$ 93,5 %, в том числе 5–6,2 %, Fe_2O_3 – не более 0,02 %, нерастворимый осадок – не более 0,2 %, селитра техническая KNO_3 по ГОСТ 19790–74	–
Li_2O	Углекислый литий Li_2CO_3 по ТУ 6-09-3728–83: содержание Li_2O_3 – не более 65 %, сульфатов в пересчете на SO_4 – не более 1,5 %, хлоридов – не более 1 % и R_2O_3 – не более 0,5 %. Лепидолит $LiF \cdot KF \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$: содержание Li_2O – 6 %. Сподумен $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SO_2$: содержание Li_2O – 8 %	–
ZnO	Цинковые белила: содержание не менее 96 % ZnO	–
PbO_2	Свинцовый глет PbO. Свинцовый сурик Pb_3O_4 по ТУ6-09-1568–78	–
ZrO_2	Циркон $ZrSiO_4$. Диоксид циркония Zr_2O_2 по ГОСТ 21997–76. Циркониевый концентрат: содержание ZrO_2 64,5 %, SiO_2 31,5 %, TiO_2 2 %, Fe_2O_3 0,5 %	–

Исходя из химического состава применяемых материалов, приведем пример расчета шихты для варки боросиликатной фритты, химический состав которой представлен в табл. 2.14, а данные для расчета — в табл. 2.18.

Требуется рассчитать рецепт для варки фритты, т. е. соотношение сырьевых материалов, благодаря которому получим фритту заданного состава. Расчет начинается с тех составных частей фритты, которые могут быть введены только одним или двумя определенными материалами. Первые оксиды SiO_2

Таблица 2.18

Данные для расчета шихты

Состав фритты		Наименование сырьевых материалов (для варки фритты)	Химический состав сырьевых материалов, %	Потери при варке фритты, %
Наименование оксида	Химический состав, %			
SiO_2	69,5	Кварцевый песок	SiO_2 – 100	–
Al_2O_3	3,5	Глинозем	Al_2O_3 – 100	–
B_2O_3	17,0	Борная кислота	B_2O_3 – 56,3, H_2O – 43,7	10
K_2O	4,0	Калий углекислый	K_2O – 68,0, CO_2 – 32,0	5
Na_2O	4,0	Сода кальцинированная	Na_2O – 58,5, CO_2 – 43,7	5
Примеси: CaO, MgO, Fe_2O_3	2,0	–	–	–
Итого	100	–	–	–

и Al_2O_3 вводятся в том же количестве, которое указано в заданном химическом составе фритты:

а) содержание песка SiO_2:
100 вес. ч. — 100
x — 69,5

$$x = \frac{69,5 \cdot 100}{100} = 69,4 \text{ вес. ч.;}$$

б) содержание глинозема Al_2O_3:
100 вес. ч. — 100
x — 3,5

$$x = \frac{3,5 \cdot 100}{100} = 3,5 \text{ вес. ч.;}$$

в) B_2O_3 вводится борной кислотой. Содержание борной кислоты H_3BO_3:
100 вес. ч. — 56,3
x — 17

$$x = \frac{17 \cdot 100}{56,3} = 30,2 \text{ вес. ч.;}$$

с учетом 10 % потерь при варке фритты:

$$30,2 + 5,63 = 35,83 \text{ вес. ч.;}$$

г) K_2O вводится углекислым калием. Содержание углекислого калия K_2CO_3:
100 вес. ч. — 68
x — 4

$$x = \frac{4 \cdot 100}{68} = 5,1 \text{ вес. ч.;}$$

с учетом 5 % потерь при варке фритты:

$$5,1 + 3,4 = 8,5 \text{ вес. ч.};$$

д) Na_2O вводится содой кальцинированной. Содержание соды кальцинированной Na_2CO_3:

100 вес. ч. — 58,5

x — 4

$$x = \frac{4 \cdot 100}{58,5} = 6,82 \text{ вес. ч.};$$

с учетом 5 % потерь при варке фритты:

$$6,82 + 2,90 = 9,70 \text{ вес. ч.}$$

Результаты расчета составов шихты для варки фритт приведены в табл. 2.19.

Таблица 2.19

Состав шихты для варки фритт

Наименование материала	Состав шихты по расчету на 100 кг стекломассы	
	боросиликатной фритты	борлитийсиликатной фритты
Кварцевый песок	69,5±1	69,0±1
Глинозем	3,5±0,7	3,5±0,7
Борная кислота	35,83±1	35,85±1
Калий углекислый	8,5±0,5	5,0±0,5
Сода кальцинированная	9,7±0,5	8,4±0,5
Литий углекислый	–	12,0±0,5
Итого	127,50	133,75

Технологическая схема переработки сырьевых материалов и смешивание шихты представлена на рис. 2.5.

Загрузка компонентов на сборочный конвейер производится в следующей последовательности:

Стекло № 1: кварцевый песок (увлажняется водой) → сода кальцинированная → глинозем → кислота борная → калий углекислый.

Стекло № 2: кварцевый песок (увлажняется водой) → сода кальцинированная → глинозем → углекислый литий → кислота борная → калий углекислый.

Сборочный конвейер подает порции компонентов на смеситель. Смешивание шихты производится в смесителе в течение 10 мин. Из смесителей готовая шихта подается в загрузочную воронку, расположенную над печью для варки стекла.

Варка фритт. Процесс получения из шихты годной к выработке стекломассы происходит в стекловаренных печах, обеспечивающих необходимые температурные условия и тепловые потоки к материалам. Температура варки фритт 1550±10 °С. Варка фритт производится в печах различных конструкций с газовым или электрическим обогревом [22]. К газовым (пламенным) печам

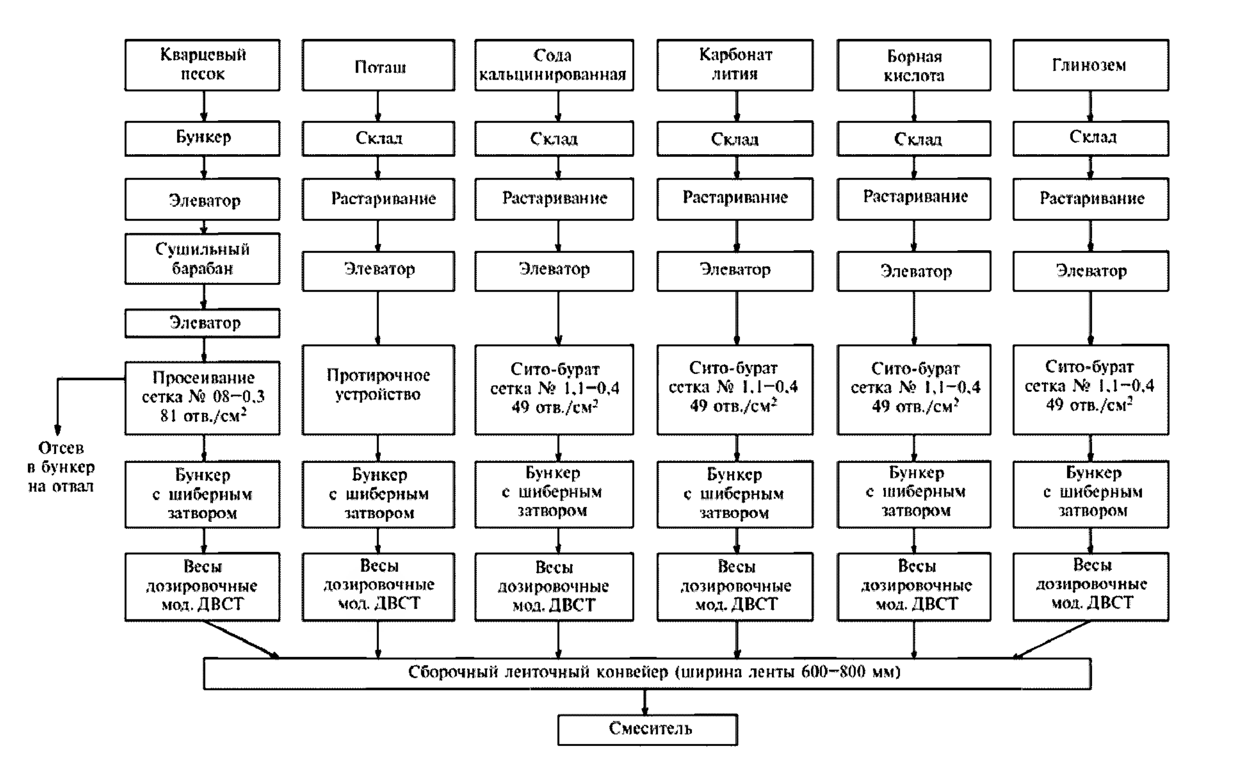


Рис. 2.5. Схема переработки сырьевых материалов при производстве фритты

относятся горшковые и ванные печи, к электрическим — печи сопротивления и высокочастотные. Кроме того, применяют комбинированные газоэлектрические печи, а также циклонные агрегаты.

По режиму работы различают периодические (горшковые) и непрерывные (ванные) печи. Кроме непрерывных используются периодические ванные печи. Работа печей разного типа характеризуется производительностью, коэффициентом полезного действия и расходом тепла на варку стекла.

Коэффициент полезного действия (КПД) печей колеблется в довольно больших пределах, %: горшковые — 6–8, периодические ванные — 15, непрерывные ванные — 17–28, электрические — 60. Производительность горшковых печей — от 100 до 1000 кг/сут, ванных — до 400 т/сут, электрических — до 80 т/сут.

По расходу тепловой энергии на варку стекла (кДж/кг стекла) различают печи: горшковые (потребляют более 40000 кДж/кг), ванные проточные (7200–8000 кДж/кг), ванные непроточные (9600–14000 кДж/кг). Из приведенных данных видно, что наиболее эффективные по доле полезного затраченного тепла на варку стекла являются электрические печи (КПД = 60 %). Однако их распространение в промышленности сдерживается относительно высокой стоимостью электроэнергии по сравнению со стоимостью природного газа и других видов топлива.

Электрические печи для варки стекла по сравнению с пламенными печами имеют следующие преимущества: отсутствие продуктов горения топлива в рабочей камере печи и потерь тепла с газами, выходящими из камеры; уменьшение потерь тепла через ограждения рабочей камеры печи как результат уменьшения площади ограждения и более эффективной тепловой изоляции кладки; создание оптимального теплового режима для процесса стекловарения и любой газовой среды над зеркалом стекломассы, уменьшение потерь из стекломассы летучих соединений. Вышеперечисленные преимущества повышают КПД печи до 0,6 (для пламенных печей КПД-0,05–0,25), уменьшают удельные расходы тепла и шихты, повышают удельный съем стекла и качество стекломассы.

На рис. 2.6 представлена электрическая стекловаренная печь.

Варка в горшковой печи. Применение горшковых печей оправдано при варке высококачественных стекол точного состава и заданных свойств в небольших количествах.

Горшковые печи могут вмещать от 1 до 6–10 горшков (тиглей). Горшки представляют собой огнеупорные сосуды конической, овальной, реже цилиндрической формы вместимостью 100–1000 кг.

Варка стекла в горшковых печах состоит из следующих операций: подготовка горшков, загрузка шихты и ее провар, осветление, перемешивание, выработка.

Горшки с загруженной шихтой обжигают в специальных печах до температуры 1000–1200 °С. Затем их в разогретом состоянии перемещают в горшковую печь, где производится окончательный обжиг до температуры, превышающей температуру рабочего максимума на 30–50 °С. Для повышения стеклоустойчивости новые горшки покрывают слоем расплавленного стекла, полученного в небольшом количестве в этом же горшке. Горшки имеют в дне отверстия для выпуска сваренной фритты, закрываемые пробками.

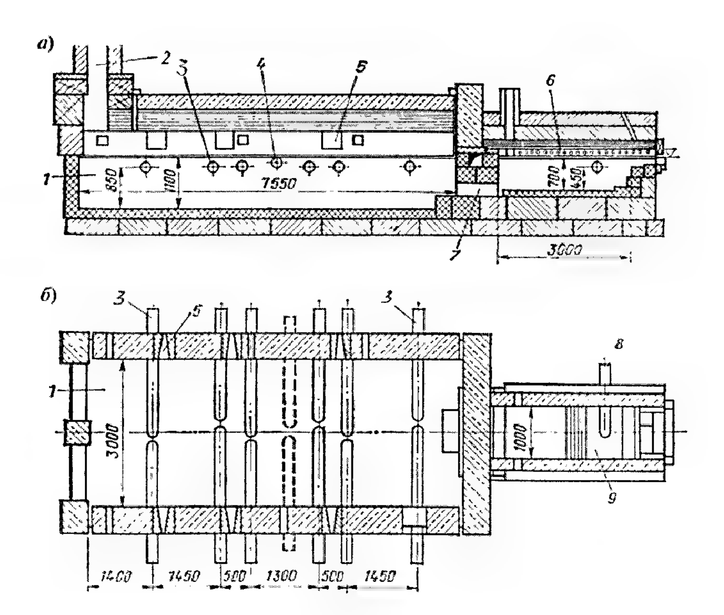


Рис. 2.6. Схема электрической стекловаренной печи:
а — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — варочный бассейн; *2* — дымовой канал; *3* — рабочие графитовые электроды; *4* нерабочий («мертвый») электрод; *5* — горелки для разогрева печи; *6* — карборундовые нагреватели; *7* — проток; *8* — заземляющий электрод; *9* — выработочный бассейн

Шихту засыпают в горшок в виде конуса, после плавления и оседания которого засыпку повторяют. Не следует засыпать шихту мелкими порциями, так как это ведет к охлаждению печи. Засыпку на конус повторяют два-три раза.

Температуру варки подбирают в зависимости от состава стекла, при этом нужно учитывать интенсивность разъедания горшка расплавом стекла, которая возрастает с увеличением температуры.

После провара стекломасса содержит значительное количество включений, для освобождения от которых температуру в печи поднимают выше температуры варки фритты на 30—40 °С. Ускорение процесса осветления достигают продувкой стекломассы с помощью сжатого воздуха, который вводят в стекломассу с помощью трубки или старинным приемом — посредством пропитанного водой куска дерева (чурки).

Выделяющиеся при продувке газы (воздух, пары воды) образуют в стекломассе крупные пузыри, которые по пути к поверхности стекломассы захватывают с собой пузыри, заключенные в расплаве, и тем самым способствуют осветлению. Продувку повторяют несколько раз с интервалом 15—30 мин и прекращают после того, как проба стекла покажет допустимое число крупных пузырей. После процесса осветления фритту выпускают через отверстия в горшках в стоящие под печью сосуды с водой.

Варка в периодических ванных печах. Периодические ванные печи в принципе не отличаются от горшковых. Однако более эффективное использование варочного пространства делает периодические ванные печи значительно экономичнее горшковых.

Шихта, загружаемая в ванную печь, образует на поверхности стекломассы слегка погруженный в нее слой толщиной около 150–200 мм. Шихта нагревается снизу расплавом стекла, а сверху пламенем. Под действием нагревания поверхность шихты спекается, затем на ней образуется тонкий слой вспененного расплава, который стекает, обнажая свежую поверхность шихты. Процесс спекания, плавления и удаления расплава с поверхности шихты, возобновляясь, идет до тех пор, пока последний слой шихты не превратится в расплав, покрытый варочной пеной.

Провариваясь, слой шихты распадается на изолированные участки, окруженные пеной, которые затем полностью растворяются, и остается одна пена.

Часть ванной печи, покрытая слоем шихты, образует границу шихты, а примыкающая к ней часть, покрытая пеной, — границу пены. Эти две части вместе называют зоной варки, которая расположена между засыпочным концом ванной печи и квельпунктом. Следующая за квельпунктом часть печи называется зоной осветления; для этой зоны характерно выделение пузырьков газа, вследствие чего поверхность стекломассы бывает покрыта скоплениями пузырьков и кажется "рябой". К зоне осветления примыкает зона студки.

Грануляция фритты. Расплавленная фритта из зоны студки отправляется для грануляции в водный бассейн. Попадая в воду, она растрескивается на мелкие части, подсушивается, затаривается и отправляется потребителю.

Существует и другой метод — сухая грануляция. В этом случае расплавленная фритта из копильника стекловаренной печи поступает на верхнюю пару гладких водоохлаждаемых валков, вращающихся навстречу друг другу. При этом из расплавленной фритты формируется тонкая лента толщиной до 1 мм, которая охлаждается между валками и затем подается на нижние валки для дробления. Нижние валки также имеют систему водяного охлаждения. Гранулированная фритта подается в сборный бункер, затаривается и отправляется потребителю.

2.1.3. Огнеупорные глины, каолины и их свойства

Глины и каолины — природные материалы полиминерального состава, образовавшиеся в результате разрушения (выветривания) алюмосиликатных горных пород (полевых шпатов, пегматитов, гранитов и др.). Они представляют собой мелкообломочные горные породы различного химико-минералогического состава [23]. Процесс разрушения полевошпатных горных пород с образованием глинистого минерала каолинита $Al_2O_3{\cdot}2SiO_2{\cdot}2H_2O$ в упрощенном виде может быть представлен следующей схемой:

$$\underset{\text{полевой шпат (ортоклаз)}}{K_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2} + CO_2 + 2H_2O \rightarrow \underset{\text{каолинит}}{Al_2O_3{\cdot}2SiO_2{\cdot}2H_2O} + \underset{\text{соль}}{K_2O} + \underset{\text{кварц}}{4SiO_2}.$$

В состав глин могут входить в качестве примеси кварц, известняки, полевой шпат, слюда, оксиды и гидроксиды железа и марганца и др.

Глинистое вещество, состоящее из глинообразующих минералов, представляет собой алюмосиликаты $xAl_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$, где x, y и z имеют различные значения для минералообразующих минералов. В кристаллическую решетку этих водных алюмосиликатов могут входить Na, K, Mg, Ca, Fe.

К важнейшим глинообразующим минералам можно, например, отнести: каолинит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, монтмориллонит $(Ca, Mg)O \cdot Al_2O_3 4 \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$, гидрослюду (иллит) $K_2O \cdot MgO \cdot 4Al_2O_3 \cdot 7SiO_2 \cdot 2H_2O$ и др.

Указанные минералы отличаются друг от друга отдельными специфическими свойствами, например, каолинит в глине повышает ее огнеупорность; монтмориллонит значительно повышает ее набухаемость, связность, пластичность и адсорбционную способность (этот минерал входит в состав бентонита); гидрослюда в глине часто сообщает ей повышенную чувствительность к сушке и малую связующую способность. Согласно В.И. Вернадскому содержащаяся в исходных алюмокислотах атомная группировка имеет циклическое строение. Данная группировка сохраняется без изменения и в каолините. Основываясь на этом, Б.В. Некрасов предложил следующую структурную формулу для каолинита:

```
              O
              |
          O – Si – O
          |   |    |
  H – O – Al  O    Al – O – H,
          |   |    |
          O – Si – O
              |
              O
```

являющуюся наиболее вероятной по сравнению с другими, предложенными различными авторами, так как она в большей степени отвечает свойствам каолинита. Например, в пользу такой формулы говорит трудность отщепления от каолинита воды. Однако если для большинства глин преобладающим глинообразующим минералом является каолинит, то Б.В. Некрасов считает, что с некоторой погрешностью состав обычной глины можно обозначать формулой $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. При таком упрощении можно считать, что глины отличаются от каолинов только общим содержанием примесей.

С химической точки зрения глинистую субстанцию (каолинит) рассматривают как свободную алюмокремниевую кислоту $H_4Al_2O_3Si_2O_9$. Устойчивость этого соединения говорит о прочности связи входящих в него атомов.

В первичных месторождениях нерастворимые продукты выветривания остаются на месте, а из них вымываются лишь водорастворимые компоненты. К таким месторождениям относятся месторождения каолинов.

Ввиду огромного разнообразия природных глин (в физическом, химическом, минералогическом и других отношениях), различного характера их применения и требований, предъявляемых к ним, существует несколько классификаций глин: по условиям образования в природе (Райс), по цвету материала после обжига (Зегер), по минералогическим, технологическим и химическим свойствам (Земятченский), по составу, а также по роду применения (Бунина) и т. д.

Общие принципы технической классификации глинистого сырья для керамической промышленности установлены ГОСТ 91169–75 и включают классификацию по огнеупорности, величине интервала спекания, водопоглощению,

содержанию глинозема и двуокиси титана в прокаленном состоянии, пластичности, содержанию красящих оксидов железа и диоксида титана в прокаленном состоянии и др.

Каолины относят к минеральным глинам, где основной глинистой субстанцией является исключительно каолинит. Они обладают свойством придавать повышенную белизну обожженному керамическому материалу, в составе связки которого содержится каолин, в том числе и абразивному инструменту.

Каолинит — основное глинистое вещество каолина — обладает кристаллической волокнисто-пластинчатой структурой. Каолинит в свободном состоянии без примесей в природе не встречается. Обязательным его спутником являются щелочь и песок, кроме того, в каолините часто присутствуют остатки горных пород, из которых он образовался. Чистый каолин, встречающийся в природе, приближается по составу к каолиниту. Он представляет собой белую землистую массу, нежную на ощупь, содержащую в виде примесей не более 2 % щелочей и 6 % песка.

Резкую грань между каолинами и глинами провести трудно. Типичные глины содержат больше примесей, чем каолины; они содержат меньше оксидов типа R_2O (например, Na_2O и т. п.) и R_2O_3 (например, Fe_2O_3 и т. п.), больше растворимых солей, но меньше химически связанной воды. Обычно глины более мелкозернисты, и их кристаллический характер выражен слабее. Пластичность глин обычно более высокая, чем каолинов.

Температура плавления чистого каолина составляет 1770 °С, а глины начинают плавиться при более низких температурах.

Плотность чистого каолина составляет 2600—2630 кг/м^3, а твердость — примерно 2 по шкале Мооса. Каолины вводятся в состав керамических связок часто вместо глин. Их использование приводит к уменьшению деформации кругов при обжиге.

Бентонит — тонкодисперсный материал, состоящий в основном из минералов монтмориллонита и байделита, обладает способностью при затворении с водой набухать (до 10 раз) и продолжительное время находиться во взвешенном состоянии; практически не используется при изготовлении керамических связок, но применяется при изготовлении формовочной смеси определенных видов абразивного инструмента, например специального инструмента для обработки подшипников. Бентонит практически не содержит органических примесей, а оксиды железа входят в состав кристаллической решетки монтмориллонита, что исключает появление "мушки" на изделиях при их обжиге. Бентонит вводят в смесь как пластифицирующую добавку, он повышает прочность полуфабриката. Температура спекания бентонита 1100—1200 °С, плавления — 1250—1400 °С. В смесях бентонит является компонентом, интенсифицирующим процессы формирования черепка изделий в процессе обжига. В России бентониты отсутствуют; разведано 14 месторождений на Украине: в Хмельницкой области (Пыжевское), Закарпатье (Горбское), Черкасской области (Дашуновское) и др. Качественные бентониты расположены в Грузии (Гумбритское, Асканское месторождения), в Туркмении (Огланлинское) и др.

Свойства глин и каолинов. Керамические свойства глинистых материалов определяются главным образом кристаллической структурой, химическим составом их основной составляющей, а также природой и количеством примесей.

Минералогический и гранулометрический составы глинистых материалов во многом определяют их физико-технологические свойства.

К основным свойствам глинистых материалов относятся пластичность, связующая способность, воздушная усадка, огнеупорность, спекаемость, огневая усадка [24–26].

Пластичность — способность глины образовывать при затворении водой тесто, которое под воздействием внешних механических усилий может принимать любую форму и сохранять ее после прекращения действия усилий. Пластичность глин зависит от зернового и минералогического составов и запесоченности глин. С повышением дисперсности глин их пластичность возрастает, наибольшей пластичностью обладают монтмориллонитовые глины, наименьшей — каолинитовые. Запесоченность глин понижает их пластичность. Количественной мерой пластичности глин служит число пластичности П (ГОСТ 21216.1–81), которое отражает разность между влажностью глины при нижней границе ее текучести $W_т$ и влажностью глины на границе ее раскатывания в жгут $W_р$ и определяется по формуле $П = W_т - W_р$ (в процентах).

Таким образом, число пластичности определяет интервал влажности, в котором глина сохраняет пластичное состояние. В зависимости от пластичности глинистое сырье подразделяют на высокопластичное с числом пластичности свыше 25, среднепластичное свыше 15 до 25, умеренно пластичное — свыше 7 до 15, малопластичное — свыше 3 до 7 и непластичное, которое не дает пластичного теста.

Связующая способность — свойство глины связывать частицы непластичных материалов, сохраняя при этом способность смеси формоваться и давать после сушки достаточно прочное изделие.

Связующая способность зависит от зернового и минералогического состава глины.

Изменения, которые происходят в глиняной массе при ее сушке, выражаются в таких свойствах, как воздушная усадка, чувствительность глин к сушке и влагопроводящая способность.

Воздушной усадкой называется уменьшение линейных размеров и объема глиняного образца при его сушке. Значение воздушной усадки зависит от количественного и качественного состава глинистого вещества и влагоемкости глины и колеблется от 2 до 10 %.

Монтмориллонитовые глины обладают наибольшей воздушной усадкой, каолинитовые — минимальной. Запесоченность глин понижает воздушную усадку.

Для одной и той же глины значение воздушной усадки зависит от начальной влажности образца. В первый период сушки значение объемной усадки равно объему испарившейся из изделия влаги. При этом в первую очередь из глины испаряется капиллярная вода, обладающая менее прочной связью с глинистыми частицами. Затем вода из гидратных оболочек начинает перемещаться в капилляры, толщина оболочки уменьшается, и частицы глины начинают сближаться. Затем наступает момент, когда частицы приходят в соприкосновение и усадка постепенно прекращается. Зерна непластичных материалов также могут сближаться за счет сближения глинистых частиц, однако препятствуют полному их сближению, т. е. наличие в смеси непластичных материалов уменьшает усадку. Воздушная усадка изделия при быстрой сушке

обычно меньше, чем при длительной, так как при длительной сушке в изделии создаются условия для более плотной упаковки частиц как глинистых, так и непластичных (отощающих) материалов.

Огнеупорность — способность глин противостоять воздействию высоких температур не расплавляясь. Огнеупорность глин зависит от химического состава. Тонкодисперсный Al_2O_3 понижает, а крупнозернистый Al_2O_3 повышает огнеупорность глин. Соли щелочных металлов (натрия, калия) резко понижают огнеупорность глин и служат наиболее сильными плавнями, оксиды щелочно-земельных металлов также снижают огнеупорность глин, но их действие проявляется при более высоких температурах. По показателю огнеупорности глинистое сырье делят на три группы: огнеупорные (1580 °С и выше), тугоплавкие (менее 1580 до 1350 °С) и легкоплавкие (менее 1350 °С).

Количественно огнеупорность характеризуется температурой, при которой стандартный образец, изготовленный из испытуемого материала, в результате размягчения при нагревании коснется своей вершиной поверхности подставки.

Спекаемость — способность глин уплотняться при обжиге с образованием твердого камнеподобного черепка. Она характеризуется степенью и интервалом спекания.

Степень спекания контролируют значением водопоглощения и плотности керамического черепка. В зависимости от степени спекания глинистое сырье подразделяют на сильноспекающееся (получается черепок без признаков пережога с водопоглощением 2—5 %) и неспекающееся (черепок с водопоглощением 5 % и менее без признаков пережога не получается). Признаками пережога являются деформация образца, видимое вспучивание или снижение его общей плотности более $0{,}05 \cdot 10^{-3}$ г/см^3. Указанные значения водопоглощения должны сохраняться не менее чем в двух температурных точках с интервалом 50 °С. Например, если в процессе обжига глины при температуре 1150 °С черепок имеет водопоглощение 0,5 %, а при 1100 °С — 2 %, то глина сильноспекающаяся, а если та же глина при температуре 1100 °С образует черепок с водопоглощением 4 %, ее относят к среднеспекающейся.

Спекание глин может происходить при разных температурах. Если температура спекания глины ниже 1100 °С, их называют глинами низкотемпературного спекания, 1100—1300 °С — среднетемпературного спекания, более 1300 °С — высокотемпературного спекания. Спекаемость глины определяется по ГОСТ 21216.9—81 и характеризуется интервалом спекания.

Интервал спекания характеризуется разностью между температурой начала пережога (деформации) глины и температурой начала спекания, при которой начинается интенсивное уплотнение материала. Наименьший интервал спекания (примерно 50—100 °С) у легкоплавких глин, наибольший (до 400 °С) — у огнеупорных.

Интервал обжига изделий в отличие от интервала спекания представляет собой разность между температурами обжига изделия, в пределах которых получают годное изделие, т. е. его водопоглощение находится в пределах требований стандарта на изделие.

Огневая усадка — уменьшение размеров абсолютно сухого глиняного образца при его обжиге. Сближение глинистых частиц происходит во время обжига при появлении жидкой фазы. Нерасплавившиеся частицы смеси при этом

смачиваются и сближаются под воздействием сил поверхностного натяжения жидкой фазы. Огневая линейная усадка колеблется от 2 до 8 %.

Линейную огневую усадку определяют в процентах по формуле $У = [(A-B)/A]100$, где A и B — линейные размеры соответственно сухого и обожженного образцов.

Процессы, протекающие в глинах при нагревании. При нагревании глиняного теста до 110 °С происходит удаление гигроскопической воды (воздушная усадка). Повышение температуры до 500—600 °С вызывает удаление химически связанной воды, что, в свою очередь, приходит к потере глиной пластичности. Дальнейшее повышение температуры приводит к удалению некоторых примесей глины, в основном органических. Примеси карбонатов и пирита Fe_2S_3 разлагаются с выделением углекислого газа CO_2 и Fe_2O_3 соответственно, а углерод и сера выгорают. При температуре выше 1000 °С выделившиеся в процессе нагревания оксиды CaO, MgO, Fe_2O_3 взаимодействуют с кремнеземом SiO_2 и образуют эвтектики и легкоплавкие силикаты, плавление которых вызывает размягчение и спекание глины. Частицы легкоплавких примесей расплавляются, происходит уплотнение глинистого черепка и повышение его прочности — период "начального спекания". При этих температурах происходит выделение гидратной воды из каолинита: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O$. При дальнейшем повышении температуры происходит расплавление легкоплавких примесей и образование жидкой фазы-расплава, который заполняет поры и стягивает частицы основного вещества, вызывая уплотнение и "огневую усадку". Максимальное уплотнение характеризует полное спекание. Более полное спекание дает большую прочность и находится в прямой зависимости от количества жидкой фазы.

Спекшимся считается черепок, который поглощает воды не более 5 % от массы образца. Температура спекания зависит от продолжительности нагревания. Повышение температуры вызывает увеличение количества жидкой фазы и снижение вязкости, размягчение материала и деформацию образца, а также вспучивание (газы в порах). С повышением температуры глина размягчается и постепенно плавится, не имея определенную температуру плавления.

Интервал между температурой спекания и температурой плавления называют интервалом плавкости. Чем больше интервал плавкости, тем меньше могут оказывать влияние на качество перепады температур в печи при обжиге. Глины, богатые Al_2O_3, обладают большим интервалом плавкости. Понижение интервала вызывается присутствием в глине примесей.

Выбор глин и каолинов для производства керамических связок. Химический состав глин и каолинов различных месторождений представлен в табл. 2.20 и 2.21. Огневые пробы глин и каолинов показаны на рис. 2.7, на котором видно, что усадка каолинов значительно меньше, чем огнеупорных глин. Классификация глинистого сырья по основным критериям качества в соответствии с ГОСТ 9165—75 приведена в табл. 2.22. Качественный минералогический состав и основные свойства глин и каолинов, определенные по ГОСТ 21216.0—75, 21216.3—75 и 19609.22—74, приведены в табл. 2.23 и 2.24 [27].

Анализ таблиц позволяет сделать следующие выводы:

основной минералообразующей породой огнеупорных глин и каолинов (табл. 2.25) является каолинит, за исключением глин марок ДН и каолинов

Таблица 2.20

Химический состав глин различных месторождений

Наименование сырья	Состав глин, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3, не более	TiO_2	CaO, не более	MgO, не более	$K_2O + Na_2O$	п.п.п.	Содержание свободного кварца, %
Глина огнеупорная латнеиская ТТ0, ЛТ1	48,0–51,5	35,0–40,0	0,8–1,20	1,2–2,0	1,0	1,0	0,5–1,0	10,0–14,0	3,8
Глина огнеупорная ДН-0, ДН-1 Ново-Райского месторождения	49,0–54,5	28,0–34,0	0,8–1,20	1,5	0,70–1,1	0,40–1,80	0,40–2,90	10,0–14,90	3,5–4,8
Глина огнеупорная ПЛГ-1, ПЛГ-1А Положского месторождения	46,2	35,0–37,2	1,20–1,65	0,40–0,70	0,60–0,70	0,30–0,60	1,00–1,70	13,0–14,0	1,3–2,7
Глина детскосельская	61,00	17,00	0,80	0,82	0,32	2,72	5,70	4,86	–
Глина огнеупорная боровическо-любытнинская БАП-1	50,00–58,00	30,0–35,0	3,0	2,0	0,5	0,5	0,9–1,5	12,5–14,5	0,0–3,0
Глина огнеупорная Кировоградского месторождения	42,0–45,0	36,0–40,0	0,70–1,60	0,12–1,25	0,10–0,21	0,30–0,18	0,11–0,2	12,00	–
Глина огнеупорная марки ЛТУ	43,90	30,10	1,55	2,50	1,50	1,50	0,46	20,00	–
Бентонит пыжевский	59,90	24,29	2,65	0,13	2,67	1,40	0,55	8,01	–
Бентонит огланхинский	68,85	14,50	1,3	Следы	5,80	3,00	1,58	5,20	–

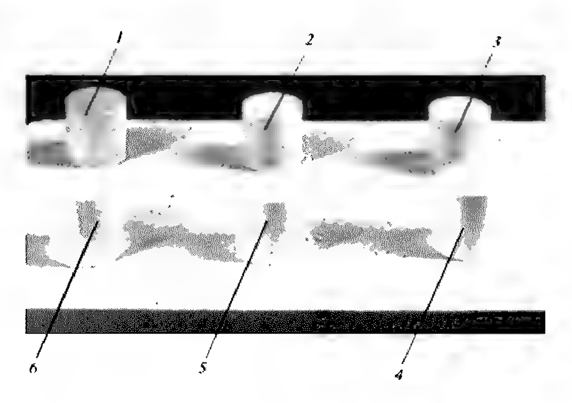


Рис. 2.7. Виды огневых проб глин и каолинов различных месторождений, обожженных при температуре 1250 °С:
1 — Ново-Райское; *2* — Латненское; *3* — Положское;
4 — Глуховецкое; *5* — Еленинское; *6* — Просяновское

Дубровинского месторождения, в которых главной минералогической основой является монотермит (см. табл. 2.23);

наиболее пластичными и прочными являются огнеупорные глины (число пластичности — более 25, механическая прочность в сухом состоянии 50—100 МПа). По пластичности и связности к огнеупорным глинам приближаются каолиновые концентраты, полученные из щелочных каолинов (число пластичности 18—25, прочность при изгибе 50—100 МПа, см. табл. 2.22). У каолинов мокрого обогащения (Просяновского и Глуховецкого месторождений) число пластичности понижается до 16 с одновременным понижением прочности при изгибе до 10—20 МПа, каолины сухого обогащения и каолины Положского месторождения имеют число пластичности 7 и низкую прочность. Каолины Глуховецкого месторождения сухого обогащения имеют самую низкую прочность при изгибе, равную 1 МПа;

высокая пластичность огнеупорных глин определяется содержанием в них перлитовой фракции: чем выше ее содержание и мельче размер, тем пластичность глин выше и прочность черепка, изготовленного на этой глине, выше;

низкую связность первичных каолинов по сравнению с глинами и вторичными каолинами автор [23] объясняет более грубым строением глинистой субстанции.

Таким образом, исследованное глинистое сырье как компонент керамических связок может быть представлено следующими группами по категории пригодности:

пластичные огнеупорные глины марок ДН-0, ЛТО, ЛТ-1, ПЛГ-1;

каолиновые концентраты из щелочных каолинов и каолин мокрого обогащения Просяновского месторождения.

Каолины сухого обогащения Глуховецкого месторождения и каолины Положского месторождения марки ПЛК-0 не рекомендуются к использованию в качестве компонентов керамических связок.

Таблица 2.21

Химический состав каолинов различных месторождений

Наименование сырья	Состав каолинов, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3, не более	TiO_2	CaO, не более	MgO, не более	K_2O + + Na_2O	п.п.п.	Содержание свободного кварца, %
Каолин положский ПЛК-0, ПЛК-1	44,0–46,20	37,80–39,50	0,40–0,60	0,70–0,90	0,3	0,4	0,30–0,66	10,0–13,0	2–3,8
Каолин просяновский:									
мокрого обогащения	46,20–50,0	35,0–37,0	0,40–0,75	0,50–1,00	0,7–1,5	0,4–1,00	1,0–1,3	13–14	1,8
сухого обогащения	47,80	36,0	0,48	0,68	0,94	0,3	0,50	13,50	4,0
Каолин глуховецкий:									
мокрого обогащения	47,50	36,70	0,60	0,72	0,3	0,33	0,26	13,50	2,1
сухого обогащения	47,90	37,10	0,65	0,49	0,12	0,22	0,12	13,60	4,6
Каолин еленинский	47,36	36,10	0,74	0,72	0,38	0,27	–	–	–
Каолин Журавлиный Лог сухого обогащения	46,60–48,00	33,5–35,2	0,80–1,20	0,60–1,00	0,80–1,50	0,42–1,00	0,60–2,20	13,0–13,5	–
Каолин обогащенный марок КФ-2, КФ-3 по ГОСТ 21286–82	46,60–48,00	33,5–35,2	0,80–1,20	1,00	1,00	1,00	0,60–1,20	3,00–14,00	–
Каолин Владимирского месторождения, сорт 0	44,65–54,00	34,90–38,50	0,80–1,30	0,64–0,65	0,1	0,04–0,13	0,60–0,80	11,90–13,90	–
Каолин Кыштымский:									
сырой	58,62	29,20	0,50	0,46	0,26	0,10	0,38	10,50	–
обогащенный	46,00	38,50	0,50	0,86	0,20	–	–	13,70	
Каолиновый концентрат дубровинский	48,0	36,2	0,90	0,17	0,45	0,70	2,0	11,80	3,0
Каолиновый концентрат Чалгановского месторождения	47,40	36,10	0,74	0,72	0,40	0,27	1,60	12,80	–
Каолиновый концентрат Екатерининского месторождения	50,0	34,1	1,2	0,6	0,15	0,15	1,5	12,1	8,0
Каолиновый концентрат Белаевского месторождения	49,2	36,0	0,6	0,2	0,35	0,35	1,4	14,5	4,0

Таблица 2.22

Классификация глинистого сырья по основным критериям качества

Марка сырья	Пластичность сырья			Механическая прочность в сухом состоянии $\sigma_{изг}$, МПа					Температура спекания, °С	
	Высоко-пластичное (> 25)	Средне-пластичное (25 + 15)	Умеренно-пластичное (15 + 7)	Высоко-прочное (> 100)	Средней прочности (> 50–100)	Умеренной прочности (> 20–50)	Низкой прочности (> 10–20)	Очень низкой прочности (> 10)	Высокая (1300)	Средняя (1100–1300)
Огнеупорные глины:										
ЛТ-1	+			+						+
ЛТ-2	+				+					+
ЛТ-У	+			+						+
ПЛГ-1		+			+					+
ПЛГ-2		+		+	+					+
ДН-0	+				+					+
ДН-1	+				+					+
Каолины:										
ПЛК-0		+				+			+	
ПЛК-1			+				+		+	
Просяновский:										
мокрого обогащения		+					+		+	
сухого обогащения			+				+		+	
Глуховецкий:										
мокрого обогащения		+					+		+	
сухого обогащения			+					+	+	
Каолиновые концентраты										
Дубровский		+			+					+
Екатериновский		+			+					+

Таблица 2.23

Качественный минералогический состав глинистого сырья

Марка сырья	Основные минерало-образующие породы		Первичные продукты механического выветривания			Содержание пелитовой фракции	
	Каолинит	Монотермит	Полевой шпат	Кварц	Гидрослюда	–1 мкм	–5 мкм
Огнеупорные глины							
ЛТ-1	+			+	Рутил	67,4	
ЛТ-2	+			+	Рутил	51,7	
ЛТУ	+			+	Рутил, углистые	+	+
ПЛГ-1	+			+			43.60–80,00
ПЛГ-2	+			+			43.60–80,00
ДН-0	+	+		+	+		75,0–78,0
ДН-1	+	+		+	+		+
Каолины							
ПЛК-0	+			+			57,4–73,0
ПЛК-1	+			+			57,4–73,0
Просяновский:							
мокрого обогащения	+		Следы	+	+		30,0–37,0
сухого обогащения	+		Следы	+	Следы		26,7
Глуховецкий:							
мокрого обогащения	+			+	Рутил		49,0–59,0
сухого обогащения	+			+	Рутил		
Каолиновые концентраты							
Дубровский	+	+	+	+	+		+
Екатериновский	+	+	+	+	+		+

Таблица 2.24

Основные свойства глин

Наименование сырья	Гранулометрический состав фракций, %		Песочная фракция +50 мкм, %	Огнеупорность, °C	Число пластичности	Связующая способность $\sigma_{изг}$, МПа	Усадка при сушке, %	Температура спекания, °C
	>0,5 мм	< 0,01 мм						
Глина огнеупорная Латненская ЛТО, ЛТ1	0,0–5,03	65,80–70,90	4	1720–1740	26–27	6,0–9,0	7,4	1300–1450
Глина огнеупорная ДН0, ДН-1 Ново-Райского месторождения	0,0–4,5	62,20–83,80	5	1690–1720	28–29	14,0–20,0	7,9–8,9	1150
Глина огнеупорная ПЛГ-1, ПЛГ-1А Положского месторождения	4,0	88,0	4–6	1730–1760	23–25	5,0–10,0	7,4	1250–1300
Глина детскосельская	2,0	64,0–70,10	6–10	1180–1200	14,0–18,2	14,0–15,0	7,2–8,0	1150
Глина огнеупорная	0,0–1,0	70,0–81,0	6,0	1650–1750	12–16	6,0–9,0	2,4–5,3	1200–1250
Глина огнеупорная боровическо-любытнинская БАП-1	0,0–1,0	77,6–81,0	6,5	1730–1750	10–15,9	5,0–10,0	7–9	1300–1450
Глина огнеупорная Трошковского месторождения	0,0–1,0	77,6–81,0	6,5	1690–1730	10–15,9	5,0–10,0	7–9	1250–1300
Глина огнеупорная Кировоградского месторождения	0,0–3,0	44,5–64,5	1,0–5,0	1710–1750	10–18	5,0–7,0	7–9	1300–1450
Глина огнеупорная марки ЛТУ	0,0–2,40	45,0–67,0	6,5–8,0	1670–1690	20–25	5,0	8,5–9,5	1200
Бетонит пыжевский	0,0–1,5	70,2–85,0	3–4	1250–1400	40–50	14–20	8–10	1100–1200
Бетонит огланлеиский	0,0–1,5	70,2–85,0	3–4	1250–1400	40–50	14–20	8–10	1100–1200

Примечание. Пределы пластичности огнеупорных глин даны по Аттенбергу.

Таблица 2.25

Основные свойства каолинов

Наименование сырья	Гранулометрический состав фракций, %		Огнеупорность, °C	Число пластичности	Связующая способность $\sigma_{изг}$, МПа	Усадка при сушке, %	Температура спекания, °C
	> 0,5 мм	< 0,001 мм					
Каолин положский ПЛК-0, ПЛК-1	0,60–5,20	38,0–40,0	1730–1770	15(7–16)	1,5–2,0	3	–
Каолин просяновский:							
мокрого обогащения	0,58–4,70	35,70–37,70	1760–1790	18 (12–24)	4,0–5,2	4	1400
сухого обогащения	7,44	26,80	1780–1790	16 (11–20)	3,0–3,2	3	1410
Каолин глуховецкий:							
мокрого обогащения	0,3–0,87	37,0–48,0	1730–1760	16 (12–20)	3,9–4,0	5–6	1380
сухого обогащения	0,3–0,8	37,0–40,0	1730–1770	15 (12–18)	3,0–3,2	4–5	1400
Каолин еленинский	0,50–4,80	34,50–35,20	1700	12–14	2,5–3,0	4–5	1360–1380
Каолин Журавлиный Лог сухого обогащения	0,3–0,8	38–60	1730–1790	12–14	2,5–3,0	5–6	1400–1410
Каолин обогащенный марок КФ-2, КФ-3 по ГОСТ 21286–82	0,4–4,70	35,7–48,0	1760–1790	12–24	4,0–5,5	4	1400
Каолин Владимирского месторождения, сорт 0	0,58–4,80	37,0–50,0	1760–1770	13–14	3,2–4,5	4–5	1400
Каолин кыштымский:							
сырой	0,56–4,05	30,90–36,2	1730–1760	12–14	2,2–3,2	–	1380–1400
обогащенный	0,40–3,80	31,20–37,80	–	–	3,2–4,2	5–6	–
Каолиновый концентрат дубровинский	0,6–4,5	38,0–46,0	1710	21 (17–25)	3,0–5,5	4–5	1380–1400
Каолиновый концентрат Чалгановского месторождения	0,6–5,0	35,0–46,0	1700	12–14	3,0–4,2	4–5	1400–1430
Каолиновый концентрат Екатерининского месторождения	0,6–5,0	36,0–46,0	1690	18 (10–22)	3,0–4,2	4–5	1400–1410
Каолиновый концентрат Белаевского месторождения	0,6–4,5	34,0–46,0	1690	18 (10–22)	3,0–4,2	4–5	1380–1400

Примечание. Пределы пластичности каолинов даны по Пребферкорну, в скобках указаны пределы пластичности.

Глины месторождений Боровическо-Любытнинского, Суворовского, Трошковского (Россия) можно рекомендовать для использования при производстве керамических связок взамен глин и каолинов украинских месторождений.

2.1.4. Волластонит и его заменители

Минерал волластонит, иначе называемый досчатым шпатом, представляет собой метасиликат кальция $CaO \cdot SiO_2$, имеющий состав, %: SiO_2 51,7, CaO 48,3 и температуру плавления 1540 °С. Для агрегатов волластонита характерно шестоватое, радиально-лучистое или волокнистое строение с длиной волокон, до 15 раз превышающих размеры их поперечника. Твердость волластонита по шкале Мооса составляет 4,5–5,5, удельная масса 2,78–2,91 г/см^3, ТКЛР $6{,}6 \cdot 10^{-7}$ [28].

Известны три модификации метасиликата кальция:

псевдоволластонит (высокотемпературная форма) α-$CaO \cdot SiO_2$;

волластонит β-$CaO \cdot SiO_2$;

параволластонит β-$CaO \cdot SiO_2$.

Однако в природе волластонит в чистом виде не встречается. Он находится главным образом в мраморизованных известняках.

В настоящее время выделяются два геолого-промышленных типа месторождений этого материала:

контактово-метосоматический (скарновый), в котором волластонит несколько загрязнен примесями железа и отчасти мрамора (скарноиды);

регионально-метаморфические отложения в регионально-метаморфизованных мраморах, которые содержат исключительно чистый безжелезистый волластонит.

К скарновому типу относятся все волластонитосодержащие образования в Казахстане, Средней Азии, Западной Сибири и на Дальнем Востоке. В них содержится от 30 до 80 % самого волластонита, остальное — примеси.

В табл. 2.26 представлены минеральный и химический составы волластонитовых руд и химический состав волластонитовых концентратов, полученных различными методами обогащения, например применением магнитно-электростатической схемы.

В основе строения волластонита лежит цепочка связанных между собой кремнекислородных тетраэдров. Для волластонита характерны игольчатые и таблетчатые кристаллы. При расплывании кристаллов образуются зерна игольчатой формы и спаянность волластонита по вертикальным граням очень велика.

При нагревании шихта с волластонитом расплавляется, нерасплавившиеся остатки волластонитовых иголок создают плотный каркас из разнонаправленных игольчато-волокнистых кристаллов, препятствующих изменению прежнего объема, т. е. происходит незначительная усадка. При последующем охлаждении изделия происходит дальнейшая кристаллизация и скрепление между собой иголок волластонита. Кроме того, в процессе обжига волластонит оказывает флюсующее действие за счет малого количества глинозема в своем составе, что оказывается более радикальным по сравнению с действием полевых шпатов. Образование стеклофазы с низкой вязкостью способствует интенсивности удаления газов из керамической смеси, что приводит к увеличению

Таблица 2.26

Минералогический и химический составы волластонитовых руд и волластонитовых концентратов

Показатель, %	Комопонент	Наименование месторождения (страна)					
		Басагинское (Казахстан)		Кайташское (Узбекистан)		Верхнее-Бадамское (Казахстан)	
		Волластонитовая руда	Волластонитовый концентрат	Волластонитовая руда	Волластонитовый концентрат	Волластонитовая руда	Волластонитовый концентрат
Минералогический состав руд и концентратов	Волластонит	56,6	90,0	–	80,0	–	72,0–80,0
	Кварц	6,3	5,0	–	5,0	–	5,0–8,0
	Кальций	7,2	2,0	–	4,0	–	4,0–7,0
	Гранит	18,3	3,0	–	4,0	–	2,0–3,0
	Пироксен	11,2	–	–	1,0	–	3,0–5,0
	Полевой шпат	–	–	–	–	–	1,0–2,0
Химический состав руд и концентратов	SiO_2	42,85–49,6	51,7–56,2	26–40	5,0–52,0	–	53,2–56,0
	Al_2O_3	1,0–1,3	0,67–3,30	1,30–3,05	2,8–3,0	–	1,50–3,30
	Fe_2O_3	2,0–12,7	0,48–1,00	0,8–2,5	0,5–1,0	–	0,7–0,8
	TiO_2	0,11–0,18	0,1	0,05–0,17	–	–	0,14–0,16
	CaO	33,50–41,20	40,90–43,50	36–50	34,9–42,0	–	33,0–39,0
	MgO	0,50–0,80	0,40–2,10	1,15–1,7	0,6	–	1,20
	K_2O + + Na_2O	–	–	0,31–1,20	–	–	–
	K_2O	–	0,12–0,7	–	0,27–0,4	–	0,2–0,3
	Na_2O	–	–	–	0,25–0,40	–	0,9–1,1
	MnO	–	0,48–0,74	0,06–0,30	0,14	–	0,16–0,17
	п.п.п.	–	2,52	13,64–29,46	1,60	–	2,3

пористости готового черепка и обеспечивает его однородность. Все компоненты смеси в таком черепке равномерно распределены и прочно скреплены между собой за счет образования маловязкой стеклофазы, насыщенной волластонитовыми цепями и пронизанной субмикроскопическими новообразованиями анортита, кристобаллита, псевдоволластонита и муллита, которые скрепляют всю массу. Все это повышает прочность керамического черепка, которая возрастает с увеличением содержания волластонита в керамической смеси.

Обладая небольшим значением коэффициента термического расширения и прямолинейной зависимостью его от температуры, волластонит способствует снижению ТКЛР всей смеси. При этом увеличивается сопротивление рас-

трескиванию изделий в случае термоудара, а при введении волластонита в связку в количестве всего 3 % компенсируется и объемное расширение, вызванное модифицированным превращением кварца в процессе охлаждения их после обжига.

Таким образом, указанные выше свойства волластонита обеспечивают увеличение прочности сырых и обожженных изделий, уменьшение их воздушной и огневой усадки, снижение ТКЛР, повышение открытой пористости и увеличение размера пор, улучшение внешнего вида готовых изделий и снижение брака.

Основные запасы волластонита сосредоточены в странах СНГ, КНР, США и Индии. Довольно крупные залежи волластонитовых скарнов известны в Мексике, Канаде, Финляндии, Австралии, Кении, Японии, Новой Зеландии, Судане, Юго-Западной Африке и бывшей Югославии. Основными производителями волластонита являются США и Китай. Добычей минерала в США заняты четыре фирмы. Фирма Processed Minerals Inc (PMI) — наиболее крупный производитель волластонита. Она разрабатывает месторождение Фокс-Нол (штат Нью-Йорк). Руда месторождения содержит в среднем 60 % волластонита; из нее в результате обогащения получают либо зернистый волластонит, расклассифицированный по размеру частиц, либо волокнистый волластонит, который получается в результате измельчения во фрикционной мельнице. В последнее время создана марка волластонита Р-15, характеризующаяся отсутствием фракции менее 15 мкм. Минимальная крупность выпускаемых волластонитовых материалов составляет примерно 1 мкм.

Волластонит месторождения Фокс-Нол является предметом экспорта. Фирма PMI приобрела также месторождения Levis и Deerchead. Запасы месторождения оцениваются приблизительно в 5 млн. т руды с содержанием волластонита 59 %.

По информации China National Non-metalic Minerals Industry Corporation добычей волластонита в стране занимаются предприятия Li-Shi Wollastionite Mining Company и Pan Shi Wollastonite Mine. Материал является предметом экспорта, в основном в Японию.

Единственное эксплуатируемое в Европе месторождение волластонита находится в Финляндии. Фирма Partek разрабатывает месторождение известняка, доломита и волластонита, расположенное близ г. Лаппенранта. Запасы волластонитосодержащей руды на этом месторождении со средним содержанием минерала 20 % составляют 0,8 млн. т. Круг применения волластонита производства фирмы Partek очень широк, в том числе применяется он и в производстве полировочных паст и мягких абразивов. В 1984 году фирма Partek выпустила 13,6 тыс. т волластонита. Она экспортировала минерал в ряд европейских стран, а также в Японию, Тайвань, Австралию, Таиланд и на Филиппины.

Фирмой Volkem Private (Индия) открыто крупное месторождение волластонита в штате Раджастхан, запасы которого оцениваются в 50 млн. т. В 1984 году в Индии выпущено 20 тыс. т волластонита.

Фирме General de Minerales (Мексика) принадлежат два волластонитовых рудника. В процессе обогащения получают волластонит четырех сортов: крупностью 6,62 см, 12,7 и 6,3 мм и 74 мкм. Химический состав волластонита различных зарубежных фирм приведен в табл. 2.27.

Таблица 2.27

Химический состав волластонита различных зарубежных фирм

Страна, фирма	Состав волластонита, мас. %									п.п.п.
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	
США, PVL	50,00	46,90	0,25	0,61	0,05	0,10	0,10	–	–	0,90
Финляндия, Partek	51,80	44,50	0,60	0,30	0,05	0,01	0,80	0,01	0,1	1,7
Индия, Volkem Private	52,00	47,00	0,14	0,31	–	–	–	–		0,55
Мексика, Gnesal de Minerales	49,82	38,40	5,34	0,96	0,14	–	–	–	0,34	4,56
Япония, О. КЁГЕ	50,00	46,00	0,3	0,3	–	0,1	0,4	–	–	2
Косово	59,72	35,24	2,38	0,27	0,1	0,39	–	0,27	0,83	0,4

Заменители волластонита. При отсутствии волластонита в связке могут использоваться: синтетический волластонит, диопсид, шлаки и анортозит.

Синтетический плавленый силикат кальция на протяжении ряда лет изготовляется на Днепропетровском метизном заводе путем сплавления в электрических дуговых печах кварцевого песка и известняка с добавкой флюорита. НИИстройкерамикой предложена технология производства синтетического силиката кальция из трепела и мела. Полученный синтетический продукт содержит 70–80 % силиката кальция. Институтом общей и органической химии АН (Армения) разработана технология получения синтетического силиката кальция путем гидротермальной переработки нефелиновых сиенитов. Содержание $CaSiO_3$ в полученном продукте составляет 90–97 %.

Крайне неравномерное распределение месторождений волластонита, ценные технологические свойства сырья и его высокая стоимость обусловили освоение в ряде стран производства синтетических силикатов кальция.

В Дании, Франции, Германии выпуском синтетических силикатов кальция занято около 10 фирм. Общий объем их производства в 1981 году составил 25–30 тыс. т.

Датская продукция под названием "Синопал" выпускается из смеси песка и мела, к которой добавляется небольшое количество норвежского доломита. Шлам подвергают термической обработке при t_{max} = 1560 °С. Образующаяся фритта гранулируется в воде, затем вновь подвергается термообработке при t = 1250 °С. В конечном продукте половину составляет синтетический силикат кальция. Остальная часть представлена галенитом $Ca_2Al_2SiO_7$ и экерманитом $MgCa_2Si_2O_7$.

В Великобритании фирма Josef Crossfield Ltd выпускает синтетические силикаты кальция "Микрокаль-160" и "Микрокаль-210", фирма Duran Chemicals Ltd — силикат кальция PR, фирма Salamon & Ltd — "Кальсиль АХ". Эти материалы представляют собой химически осажденные гидратированные силикаты кальция.

Синтетические метасиликаты кальция производят также в Италии и США. В Италии продукт под названием "Волланит" выпускает фирма Thermo Cemica Apuana из смеси кремнезема, мела и доломита по схеме, применяемой в Дании.

В США среди гидратированных и безводных синтетических метасиликатов кальция основными являются "Силен", выпускаемый химическим отделени-

ем Columbia, и "Микроцел", известный в Европе под названием "Кальфло", фирмы Johns Manvill.

Диопсид — природный силикат Ca и Mg ($CaMg[SiO_3]_2$) — входит в группу пироксенов. Температура плавления 1400–1500 °С, цвет чистого диопсида грязно-зеленый, серо-зеленый, иногда белый, блеск стеклянный, твердость по Моосу 5,5–6,0, плотность 3,2–3,3 г/см^3. Наиболее чистый диопсид присутствует в кристаллических известняках. Введение диопсида в состав керамической связки позволяет снизить температуру обжига изделий и улучшить их физико-механические свойства.

Крупные запасы уникального по качеству маложелезистого диопсида находятся в Южном Прибайкалье (Слюдянское месторождение), они имеют следующий состав, вес. %: SiO_2 71,90, Al_2O_3 1,02, CaO 15,0, MgO 12,2, Fe_2O_3 следы, п.п.п. 3,41, также диопсидовые породы широко распространены в Алдане (Якутия). Например, химический состав диопсидовых пород Эмельджаковского месторождения таков, мас. %: SiO_2 47,7, Al_2O_3 8,6, MgO 15,6, CaO 18,6, Fe_2O_3 2,7, P_2O_5 0,1, Na_2O 0,5, K_2O 2,0. Средний минералогический состав диопсидовых пород этого месторождения: диопсид — 72,7 %, флогопит мелкозернистый — 12,3 %, прочие — 13 %.

Шлаки, химический состав которых соответствует химическому составу волластонита, в ряде случаев позволяют получить керамические связки с малой усадкой и низкой температурой спекания. Исследования по применению шлаков проводились в различных институтах: НИИстройкерамике, НИИСМе, Алма-Атинском НИИстройпроекте, НИИкерамзите и Новочеркасском политехническом институте.

Анортозиты Васьковического месторождения (Украина) представляют собой крупно- и грубозернистую светло-серую породу, 85–89 % которой составляет плагиоклаз. Химический состав анортозита, %: SiO_2 55,94, Al_2O_3 28,06, Fe_2O_3 0,37, CaO 9,39, MgO 0,22, K_2O 0,91, Na_2O 5,29, п.п.п. — 0,5. Анортозиты в нашей стране в отличие от зарубежной практики как сырье для керамической промышленности не изучались.

2.1.5. Тальк

Тальк — гидросиликат магния $3MgO{\cdot}4SiO_2{\cdot}H_2O$ с плотной структурой — называют жировиком или стеатитом. Образование талька в природе связано с действием на доломит $CaCO_3{\cdot}MgCO_3$ щелочных растворов, содержащих CO_2 и SiO_2. Огнеупорность талька 1490–1510 °С.

В составе талька содержатся хлориты (1–6 %) и рудные минералы (не менее 1 %).

Тальк молотый для керамической промышленности выпускается по ГОСТ 21234–75 и должен соответствовать нормам, указанным в табл. 2.28.

Месторождения талька и его химический состав представлены в табл. 2.29.

2.1.6. Криолит

Криолит выпускается по ГОСТ 10561–80; для применения в качестве компонента керамических связок используется марка КП с отсутствием остатка на сите с сеткой № 2 по ГОСТ 3584–73, который предусматривает следую-

Таблица 2.28

Показатели качества талька

Наименование показателей	Нормы для марок			Методы испытаний
	ТМК-28	ТМК-27	ТМК-24	
Содержание оксида магния MgO, %, не менее	28	27	24	По ГОСТ 19728.8–74
Содержание железа в пересчете на Fe_2O_3, %, не более	5	6	8	По ГОСТ 19728.4–74
Содержание оксида кальция CaO, %, не более	0,5	0,8	–	По ГОСТ 19728.7–74
Потери массы при прокаливании (п.п.п.), %, не более	6	7	8	По ГОСТ 19728.17–74
Содержание влаги, %, не более	1	1	1	По ГОСТ 19728.19–74
Остаток на сетке № 0,14, %, не более	2	2	2	По ГОСТ 19728.20–74

Таблица 2.29

Месторождения и химический состав талька

Наименование месторождения	Состав талька, мас. %						
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	$K_2O + Na_2O$	п.п.п.
Онотское	56,0–60,0	0,6–2,5	0,4–1,2	29,0–31,0	2,7–5,5	0,4	4,6–7,5
Миасское	56,0–60,0	0,6–2,5	0,4–1,2	29,0–31,0	2,7–5,5	0,4	4,6–7,5
Шабровское	56,0–60,0	0,6–2,5	0,4–1,2	29,0–31,0	2,7–5,5	0,4	4,6–7,5
Корейское	58,0–60	0,6–2,7	0,2–1,0	30–32	2,0–2,5	0,4	5–6

щие физико-химические показатели: внешний вид — мелкокристаллический порошок от слабо-розового до серовато-белого цвета, в состав которого входят следующие компоненты, мас. %: фтора F не менее 52, Na 13 %, Al не более 23,0, SiO_2 1,5, Fe_2O_3 0,1, сульфатов 1,0 влаги 0,8 и P_2O_5 0,6.

Искусственный криолит пожаро- и взрывобезопасен, токсичен, по степени воздействия на организм относится к веществам второго класса опасности. Поэтому при работе с криолитом необходимо соблюдать следующие основные правила: приступать к работе только в специальной одежде в соответствии с типовыми отраслевыми нормами; обязательно пользоваться индивидуальными средствами защиты органов дыхания, лица и глаз; следить за постоянной работой вентиляционных установок и коммуникаций; не допускать попадания криолита внутрь организма.

2.2. Исследование и разработка керамических связок

2.2.1. Связки для электрокорундовых материалов

Вопросу разработки керамических связок для изделий из электрокорунда белого посвящена серия исследовательских работ, выполненных во ВНИИАШе в период с 1945 по 1980 год Н.Е. Филоненко [29–32].

Н.Е. Филоненко методом микроскопических исследований керамических связок пришла к выводам, что:

повышению механической прочности абразивных инструментов способствует взаимодействие связки с корундом в процессе обжига, но только при условии, когда составы связок в результате обогащения их с корундом смещаются в область составов, не склонных к кристаллизации, или достаточно вязких составов, кристаллизация которых ограничивается контактным минералообразованием, увеличивающим сцепление связки с зерном электрокорунда без нарушения общей стекловидной структуры связки;

керамическая связка, растворяя корунд в процессе обжига абразивного инструмента, повышает свою огнеупорность, что позволяет использовать легкоплавкие связки, исключая вытекание и деформацию изделий, при этом количество растворенного корунда зависит от конечной температуры обжига и химического состава связки.

На основании этих выводов Н.Е. Филоненко была предложена керамическая связка № 5 огнеупорностью 1140–1160 °С, состоящая из смеси полевого шпата, огнеупорной глины и силикат-глыбы (до 15 %).

С.Г. Воронов, продолжая изучение взаимодействия керамических связок с абразивным зерном, пришел к выводу, что количество растворенного связкой корунда зависит как от состава связки, так и от соотношения количества связки с величиной поверхности шлифзерна.

При изменении величины поверхности шлифзерна изменяется зернистость и структура изделия, а при изменении количества связки меняется его твердость. Например, если реакционно-активная связка обладает необходимой подвижностью в изделии со средней зернистостью шлифматериала, то такая же подвижность связки в крупнозернистом изделии может привести к ее вытеканию из изделия, а также к вспучиванию и деформации самого изделия. Аналогичная картина может наблюдаться при изменении твердости в сторону ее повышения за счет увеличения количества связки. Эти выводы С.Г. Воронова подтвердились при промышленном освоении связки № 5, так как оказалось, что она пригодна только для изготовления изделий средней зернистости и твердости, а в других случаях изделия на этой связке вспучиваются и деформируются.

Таким образом, для изготовления изделий во всем диапазоне характеристик, наряду с регулированием твердости за счет уплотнения структуры, необходимо и регулирование состава связки.

На основе результатов исследования керамических связок С.Г. Воронов считает, что основным критерием, определяющим качество связки, является прочность абразивного черепка при заданной твердости, зависящая от прочности как самой связки, так и ее сцепления со шлифзерном в инструменте, при этом уровень прочности сцепления связки со шлифзерном обусловлен их химическим взаимодействием в процессе обжига, т. е. практически реакционной способностью связки. По мнению С.Г. Воронова, все виды керамических связок являются реакционно-способными к электрокорунду и отличаются лишь степенью реакционной активности.

Автор [33] при исследовании взаимодействия керамической связки с абразивным зерном в процессе обжига абразивного инструмента современными методами (электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа) и оптическими методами исследования определил, что на границе раздела фаз связка—зерно образуется хорошо видимый связующий переходный слой тол-

щиной примерно 10 мкм, который по морфологии и составу существенно отличается от обеих прилегающих к нему фаз.

Показатель преломления зоны, образующейся на границе зерна электрокорунда, иной, чем у самого корунда (рис. 2.8, *а*). Со стороны связки этот слой имеет различную толщину. При длительном обжиге происходит отделение частиц электрокорунда от границы раздела зерно—связка и распределение их в керамической связке в виде отдельных кристаллов и агрегатов (рис. 2.8, *б*, *в*), которые затем полностью растворяются в связке, скорость расплавления их зависит от вязкости расплава (рис. 2.8, *г*).

На рис. 2.9 представлено электронно-микроскопическое изображение структуры переходного слоя между зерном электрокорунда и керамической связкой, из которого видно, что происходит отделение микрокристаллов друг от друга и идут рекомбинационные процессы. На рис. 2.10 показано дальнейшее развитие этих процессов.

При продолжении обжига и выдержке при максимальной температуре эти "плавающие" частицы переходят в боросиликатную связку, увеличивая в ней содержание алюминия, повышая тем самым температуру размягчения связки более чем на 100 °С, и подтверждая, например, тот факт, что при огнеупорности связки, равной 1100 °С, можно обжигать инструмент без его деформации при 1300 °С.

Таким образом, автор [34] считает, что выбор максимальной температуры и времени выдержки позволяет обжигать инструмент, не разрушая переходного

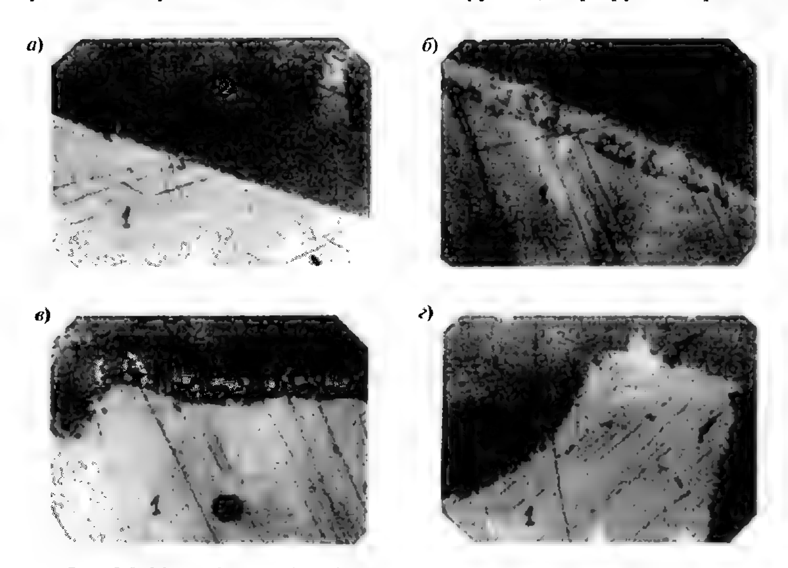


Рис. 2.8. Микрофотографии фазовой границы электрокорундового зерна со связкой в абразивном инструменте на керамической связке (свет отраженный):

а, *в*, *г* — увеличение х250; *б* — увеличение х500; *1* — зерно электрокорунда; *2* — связка; *3* — связующий слой

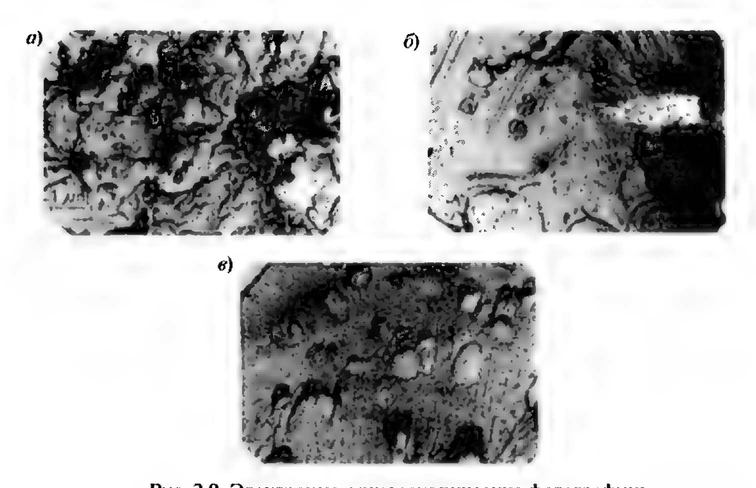


Рис. 2.9. Электронно-микроскопические фотографии:

а — структура керамической связки (*1*) (увеличение ×15000); *б*, *в* — переходный слой, возникающий у границы между зерном электрокорунда (*2*) и керамической связкой (*3*) при оптимальных условиях термообработки (увеличение ×21500)

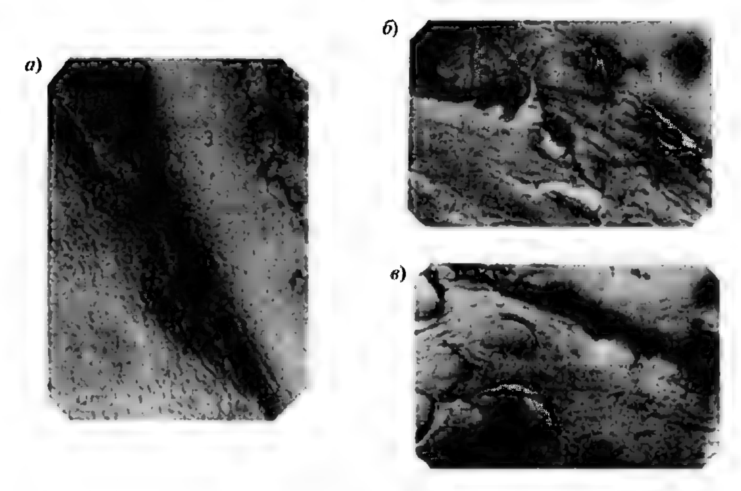


Рис. 2.10. Электронно-микроскопические фотографии фазовой границы между зерном и связкой в электрокорундовом абразивном инструменте на керамической связке:

а — первичный соединяющий слой (*3*) между зерном (*1*) и керамической связкой (*2*) (увеличение ×10500); *б* — соединяющий слой (*3*) в начале рекомбинации с агрегатами кристаллов корунда (увеличение ×10500); *в* — связующий слой (*2*) между корундом (*1*) и невидимой на снимке керамической связкой после дальнейшей рекомбинации (увеличение ×10500)

слоя, который способствует "настоящей связи" между зерном и связкой и, следовательно, ощутимо влияет на шлифовальные свойства инструмента.

Таким образом, современные инструментальные методы исследования подтвердили выводы Н.Е. Филоненко о механизме взаимодействия керамической связки с зерном электрокорунда, сделанные ею 25 лет назад.

При исследовании механизма взаимодействия электрокорунда со стекловидной связкой авторами [35] учитывались следующие факторы:

появление жидкой фазы зависит от температуры плавления самого легкоплавкого компонента, как правило жидкого стекла;

оксид натрия является одним из самых активных реагентов в обычных плавящихся связках;

на границе раздела фаз в первую очередь происходит взаимодействие между оксидом натрия и оксидом алюминия.

В результате взаимодействия оксида натрия с корундом появляется новая кристаллическая фаза, которая начинает растворяться в расплаве со скоростью, определяемой по уравнению Нернста [36]. Для определения диффузии D используется уравнение линейной диффузии с постоянной скоростью к плоской поверхности при постоянной концентрации ионов:

$$n = -\frac{K_0}{2D}x^2 + \frac{K_0 L}{D}x + n_0, \qquad (2.1)$$

где D — коэффициент диффузии, м/с^2; K_0 — константа скорости, кг·моль/(м^3·с); L — толщина диффузионного слоя, м; n_0 — концентрация ионов на расстоянии L, кг·моль/м^3; n — концентрация ионов в точке x, кг·моль/м^3; x — расстояние от поверхности кристалла до точки с концентрацией n, м.

Решение уравнения (2.1) по отношению к коэффициенту диффузии будет иметь вид

$$D = \frac{K_0 x(2L - x)}{2(n - n_0)}. \qquad (2.2)$$

В эксперименте в качестве исходных материалов использовались корундовые монокристаллы с содержанием оксида алюминия 99,99 % и стекловидные связки, содержащие щелочные оксиды в количестве 28, 32, 36, 40, 44 и 48 мас. %.

Образцы подвергались термообработке при температурах 1150 и 1250 °С с выдержками 15, 25 и 35 ч. На рентгеновском микроанализаторе фирмы Hitachi были измерены концентрации алюминия, натрия, кислорода и кремния в стеклосвязке. Установлено, что основное экспоненциальное изменение концентрации алюминия в диффузионном слое сопровождается дополнительными изменениями (рис. 2.11). Сильно выраженная неравномерность концентрационных кривых установлена также и для ионов кислорода и натрия.

Неравномерность в изменении концентрации пропорциональна температуре и времени выдержки, а толщина диффузионного слоя находится в обратно пропорциональной зависимости от концентрации оксида натрия.

Установленные закономерности дают основание авторам утверждать, что диффузия алюминия из корунда в керамическую связку является сложным процессом, сопровождающимся химическим взаимодействием между ионом

алюминия и компонентами связки. Это подтверждается изменением коэффициента диффузии по глубине переходного слоя. Так, у образца на связке с содержанием R_2O 28 %, термообработанного при 1150 °С в течение 35 ч, коэффициент диффузии алюминия, вычисленный по формуле (2.2), варьируется от $0{,}99\cdot10^{-12}$ до $9{,}75\cdot10^{-12}$ м²/с.

Изучение взаимодействия электрокорунда нормального с керамическими связками марок К8 и К5, изготовленных на перлите и пегматите, авторы проводили микрорентгеноспектральным методом [37]. В табл. 2.30 приведены сравнительные значения интенсивностей рентгеновского излучения AlK_α в исходной связке и в мостиках связки, из анализа которой следует, что благодаря частичному растворению корунда (рис. 2.12, *а*, позиции *1*, *2*, *4*, *5*, и рис. 2.12, *б*, позиции *1*, *2*, *3*) и гексаалюмината кальция (см. рис. 2.12, *а*, позиция *3*, и рис. 2.12, *б*, позиции *4*, *5*) увеличивается содержание алюминия. При этом с увеличением количества связки в абразивном черепке относительное количество растворенного глинозема в связке снижается, что также было подтверждено результатами химического анализа образцов. Более легкоплавкая связка К5 обладает большей реакционной способностью. Наблюдается также несколько более активное взаимодействие с корундом обеих связок при использовании в их составе перлита. Кривые на рис. 2.12, *а*, *б* свидетельствуют о равномерном распределении алюминия от контакта корунд—связка через мостик связки до контакта связка—корунд вне зависимости от содержания связки в абразивном черепке (от 9 до 21 вес. ч. связки в черепке).

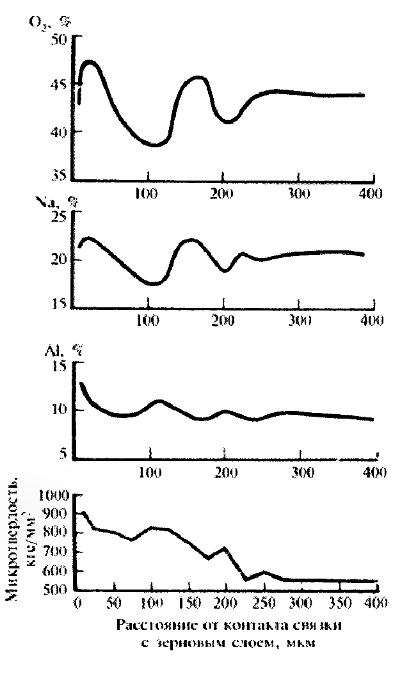


Рис. 2.11. Кривые распределения ионов кислорода, натрия, алюминия и изменение микротвердости в переходном слое корунд—связка (R_2O — 28 %, термообработка при 1150 °С — 25 ч)

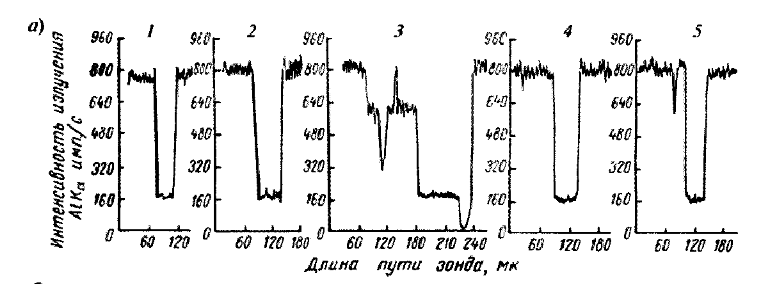
За время выдержки при максимальной температуре в абразивном черепке, где длина мостика связки между зернами составляет примерно 100—150 мкм, корунд равномерно диффундирует по всему объему мостика связки, т. е. длительность производственного процесса обжига обеспечивает системе абразивное зерно — стекловидная керамическая связка состояние равновесия, соответствующее заданной температуре выдержки.

Таким образом, изменение концентрации корунда в контактной зоне абразивного зерна со связкой, как это показано в работах [33, 34], не подтверждается. Чтобы проследить перепад концентрации в зоне контакта корунда с керамической связкой, был поставлен специальный опыт. Кусочек электрокорунда размером 10 × 5 × 5 мм помещали в тигель, заполненный керамической

Таблица 2.30

Интенсивность рентгеновского излучения AlK_{α} в исходной связке и мостиках связки, вес. ч.

Марки связки	Интенсивность излучения AlK_{α} связок, имп./с																											
	К8 пегматитовой							К8 перлитовой							К5 пегматитовой							К5 перлитовой						
Характеристика образца	Исходное	9	12	15	18	21	Среднее	Исходное	9	12	15	18	21	Среднее	Исходное	9	12	15	18	21	Среднее	Исходное	9	12	15	18	21	Среднее
Абразивный черепок из шлифзерна № 1																												
Центр мостика связки	134	157	155	147	142	135	147	121	153	148	147	140	137	145	108	156	152	146	140	137	146	106	165	163	157	152	152	158
Край мостика связки у зерна	134	160	150	144	141	137	146	121	154	151	150	147	145	149	108	156	151	147	142	141	147	106	162	161	155	150	146	155
Абразивный черепок из шлифзерна № 2																												
Центр мостика связки	134	157	149	149	149	146	150	121	156	150	142	140	137	145	108	158	145	142	140	138	145	106	150	149	150	141	136	145
Край мостика связки у зерна	134	155	152	152	149	147	151	121	153	151	148	147	140	148	108	153	147	146	145	136	145	106	150	148	145	143	135	144



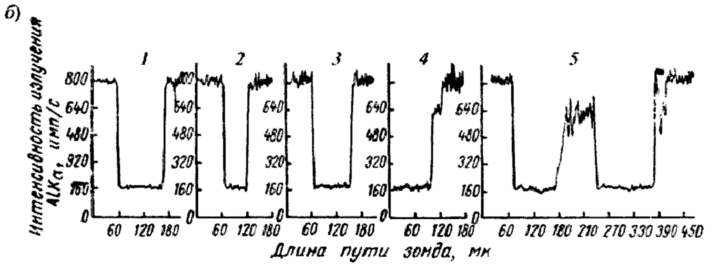


Рис. 2.12. Диаграммы распределения алюминия на контакте зерно—связка и в мостиках связок:

а — связка К8; *б* — связка К5; *1* — 9 вес. ч.; *2* — 12 вес. ч.; *3* — 15 вес. ч.; *4* — 18 вес. ч.; *5* — 21 вес. ч.

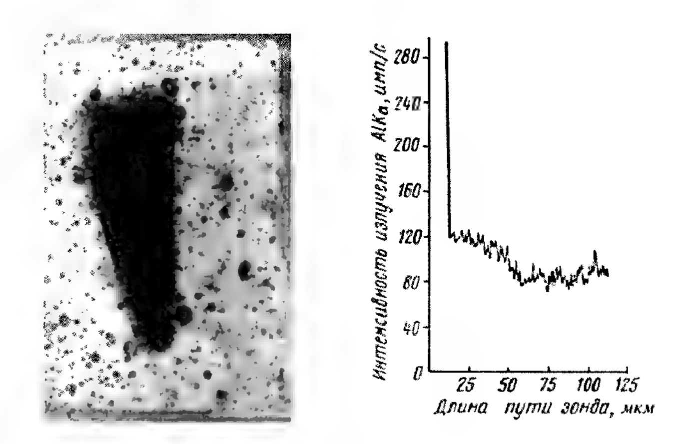


Рис. 2.13. Электрокорунд в керамической связке:

а — аншлиф образца обожженной связки с погруженным в нее зерном электрокорунда (увеличение ×6); *б* — диаграмма распределения алюминия в контактной зоне корунд—связка

связкой, и подвергали обжигу при температуре 1250–1280 °С. Затем образец разрезали, отполировывали срез и определяли распределение алюминия в контактной зоне. Когда слой связки был чрезмерно велик (рис. 2.13), действительно наблюдали перепад концентрации Al в связке на расстоянии 50 мкм от контакта ее с корундом.

Таким образом, установлено, что корунд распределяется в мостиках связки абразивного черепка равномерно, при этом количество его в связке абразивного инструмента различной твердости (СМ1–ВТ1) неодинаково. Это позволяет считать, что для одной и той же заданной рецептуры различия в свойствах обожженного абразивного изделия при прочих равных условиях зависят от характера распределения связки в черепке и от степени ее взаимодействия с абразивным зерном.

Унификация керамических связок

В отчетных материалах ВНИИАШа (руководители работ С.Г. Воронов, М.В. Ботрякова, З.М. Прозорова) изложены результаты исследований по унификации керамических связок, применяющихся в промышленности для изготовления инструмента из белого электрокорунда, К8 (853), К5 (516), К1 и № 5 и по разработке новых связок.

В табл. 2.31 представлены шихтовые составы промышленных и унифицированных связок, в табл. 2.32 — свойства связок и в табл. 2.33 — физико-механические свойства абразивных черепков.

Унификация связок позволила:

обеспечить повышение прочности абразивного инструмента и стабильности процесса его изготовления за счет установления оптимального количества вводимых в связки огнеупорной глины, талька и боросиликатной фритты;

рекомендовать связки К5 и № 5 для изготовления инструмента твердостью от М2 до СТ3 как обеспечивающие максимальную механическую прочность, связку К8 — для изделий твердостью СТ3 и выше;

обосновать при составлении рецептуры возможность понижения структуры по мере повышения твердости изделий;

обеспечить выпуск инструмента для работы при скорости 50–60 м/с.

Таблица 2.31

Шихтовые составы керамических связок

Наименование компонента	Марка связки						
	К8 (853)	К8У (853У)	К5 (К516)	К5У (К516У)	К1	№ 5	№ 5У
Глина латненская	40	30	20	30	–	20	30
Глина детскосельская	–	–	–	–	50	–	–
Шпат приладожский	48	58	30	20	50	46	40
Тальк	12	12	–	–	–	19	15
Борное стекло	–	–	40	40	–	–	–
Силикат-глыба	–	–	–	10	–	15	15

Примечание. У — унифицированная.

Таблица 2.32

Свойства керамических связок различных марок

Свойство связки	Марки связки						
	К8 (853)	К8У (853У)	К5 (К516)	К5У (К516У)	№ 1	№ 5	№ 5У
Удельный вес связки прокаленной при 1250 °С, г/см^3	2,51	2,51	2,41	2,41	2,45	2,6	2,6
Температура плавления связок, °С	1280	1230–1240	1120	1120	1200	1140–1160	1180
Температура плавления смеси (связка + силикат), °С	1180	1160	1080	1100	1090	1090	1100
Растекаемость связки при 1250 °С, %	97,0	127,0	225,0	226,0	119,1	174,0	171,0
Растекаемость смеси (связка + силикат) при 1250 °С, %	173,0	167,0	243,0	246,0	182,0	259,0	237,0
Коэффициенты линейного расширения в интервале температур 100–750°, $\alpha \cdot 10^{-7}$:							
сплавленных связок	68,5	68,5	63,7	67,0	61,6	61,6	61,6
сплавленных смесей (связка + силикат)	112,3	112,3	107,5	107,5	98,3	98,0	98,0
абразивных черепков, изготовленных из смесей, увлажненных органическими увлажнителями	78,4	78,4	78,4	78,4	78,4	78,4	78,4
абразивных черепков, изготовленных из смесей, увлажненных жидким стеклом	80,5	80,5	82,5	82,5	84,7	82,5	82,5

Примечание. При определении некоторых свойств силикат натрия добавлялся в виде измельченной силикат-глыбы из расчета 0,194 г на 1 г связки, что соответствует 4,5 вес. частей жидкого стекла, приходящегося на 10 вес. ч. связки при увлажнении формовочных смесей жидким стеклом удельным весом 1,48.

Таблица 2.33

Физико-механические свойства абразивных черепков из материала 25А40 структуры 6 на унифицированных связках

Марка связки	Количество связки, вес. ч., %	Прочность		Модуль упругости, МПа·10^{7}	Твердость по ГОСТ 18118–79
		на разрыв, $\sigma_р$, МПа	на изгиб, $\sigma_и$, МПа		
К8У	7	9,6	19,8	32,0	М3
К8У	12	12,0	23,1	41,5	С1
К8У	17	12,8	25,0	47,0	СТ1–СТ2
К5У	7	14,0	30,0	44,0	СМ1
К5У	12	15,3	33,8	59,0	С2
К5У	17	16,1	35,2	69,1	СТ2–СТ3
5У	7	12,5	24,8	37,5	М3
5У	12	13,8	28,8	62,0	С1
5У	17	14,3	30,4	82,7	СТ1

Марка связки	Количество связки, вес. ч., %	Прочность		Модуль упругости, МПа·10^{-7}	Твердость по ГОСТ 18118-79
		на разрыв, $\sigma_р$, МПа	на изгиб, $\sigma_и$, МПа		
К1	7	11,4	23,0	41,2	М3
К1	12	13,3	26,6	55,0	С2
К1	17	14,2	28,5	62,0	СТ2

Показано, что прочность абразивного черепка увеличивается на 15–20 % при применении высококачественного полевошпатового сырья и особенно при использовании неборсодержащих связок, например связки типа К8.

Поисковые работы, связанные с введением в связку оксида лития (сподуменовым концентратом) позволили повысить механическую прочность абразивных черепков на 20–30 % по сравнению с борсодержащей связкой К5.

Методами математической статистики и симплекс-решетчатого планирования эксперимента, а также методом Шеффе исследованы свойства связок для электрокорунда в системах каолин — полевой шпат — кварц [38, 39] и каолин — полевой шпат — боросиликатная фритта [40]. Изучались следующие свойства керамических связок абразивного инструмента: огнеупорность и реакционная способность связок, прочность свежезаформованных образцов, прочность обожженных образцов на разрыв и изгиб, твердость при температуре обжига образцов 1230±10 °С. На основе полученных данных рассчитаны зависимости изменения свойств керамических связок и абразивного инструмента в пределах изученного поля трехкомпонентной системы и определены рациональные составы связок, обеспечивающие максимальную прочность инструмента, вес. %: каолин — 15, полевой шпат — 50–70, кварц — 30–35, каолин — 15–35, полевой шпат — 30–45, фритта — 30–40 (рис. 2.14).

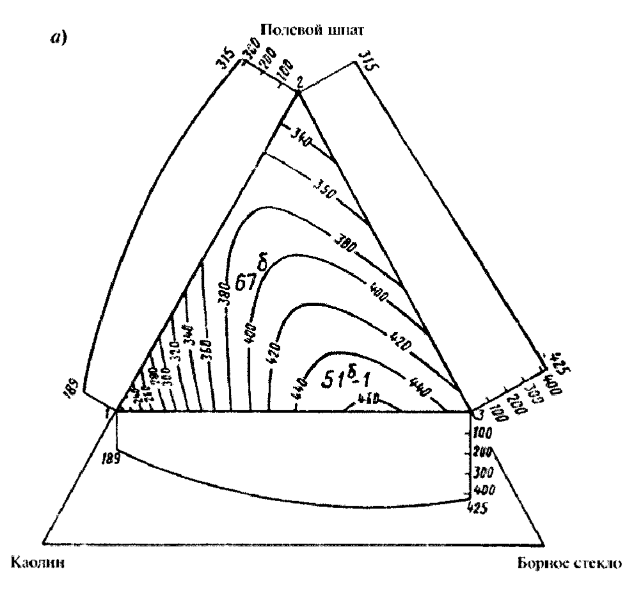
Авторы [41, 42] подтвердили выводы работ С.Г. Воронова с сотрудниками, что оптимальным составом связок для электрокорундовых материалов являются борсодержащие составы.

Влияние температуры обжига и времени выдержки инструмента из электрокорунда белого на связке № 5 огнеупорностью 1100 °С и связке К8 огнеупорностью 1250–1280 °С представлено в табл. 2.34 автором [43].

Из табл. 2.34 видно, что максимальное значение прочности на изгиб ($\sigma_{изг}$ = = 32,3 МПа) наблюдается в образцах на связке № 5, обожженных при температуре 1300 °С с выдержкой 4 ч. При снижении температуры обжига до 1280 °С $\sigma_{изг}$ уменьшается на 20–30 %, а при увеличении до 1320 °С $\sigma_{изг}$ снижается в 1,5–2 раза.

На связке К8 получены аналогичные результаты ($\sigma_{изг}$ = 34 МПа при температуре обжига 1300 °С и выдержке 4–8 ч).

Оптимальной температурой обжига инструмента, изготовленного из мелкозернистого материала (25АМ40) на связке К8 без увлажнения жидким силикатом, является температура обжига 1300–1320 °С, а время выдержки составляет 8 ч ($\sigma_{изг}$ = 68–80 МПа). При этом изменяются также модуль упругости ((46,3–84,5)·10^{6} кг/см^2) и твердость (от М3 до Т2).



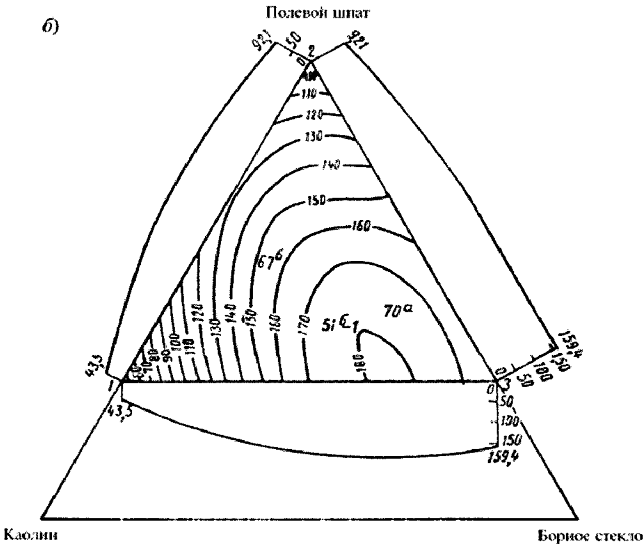


Рис. 2.14. Изменение $\sigma_р$ (*а*) и $\sigma'_{ия}$ (*б*) абразивных изделий в зависимости от содержания сырьевых материалов в связке

Таблица 2.34

Влияние температуры и времени обжига на физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого на связке № 5 и К8

Связка	Температура, °С	Время выдержки, ч					
		0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0
5	*Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа*						
	1230	21,5	21,9	23,3	23,6	19,8	26,1
	1280	27,7	24,7	21,2	30,0	31,5	31,0
	1300	28,4	28,4	30,1	32,3	31,1	25,1
	1320	18,7	21,3	19,7	24,4	26,2	20,4
	Модуль упругости, $E_x \cdot 10^{-7}$ МПа						
	1230	32,8	41,0	41,7	40,4	41,4	38,3
	1280	41,7	41,4	32,0	35,7	40,0	38,9
	1300	–	39,6	35,7	34,9	27,0	30,6
	1320	39,4	29,0	28,5	40,2	42,2	35,4
	Глубина лунки, мм, – твердость по ГОСТ						
	1230	4,46 –	4,56 – СМ2	4,50 – СМ2	4,11 – С1	4,10 – С1	4,32 – СМ2
	1280	4,15 – С1	3,90 – С1	3,87 – С1	3,90 – С1	4,15 – С1	3,65 – С1
	1300	4,10 – С1	3,55 – С1	3,50 – С1	3,50 – С1	3,33 – С2	4,00 – СМ2
	1320	4,96 – СМ2	4,80 – СМ2	4,50 – СМ2	4,45 – СМ2	3,93 – С1	3,89 – С1
К8	*Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа*						
	1230	24,0	23,1	27,5	23,9	21,8	22,0
	1280	23,9	23,0	26,1	26,8	-	27,5
	1300	29,2	21,4	27,3	33,9	34,0	31,5
	1320	26,8	23,0	27,4	28,7	27,6	21,2
	Модуль упругости, $E_x \cdot 10^{-7}$ МПа						
	1230	26,2	30,7	36,5	36,0	25,8	29,6
	1280	26,9	25,5	25,7	24,8	28,3	23,3
	1300	33,1	35,7	30,6	26,4	41,1	29,2
	1320	31,5	–	31,2	38,8	42,3	45,0
	Глубина лунки, мм, – твердость по ГОСТ						
	1230	4,46 – СМ2	4,29 – СМ2	4,11 – С1	4,28 – СМ2	4,49 – СМ1	3,87 – С1
	1280	4,08 – С1	3,80 – С1	4,07 – С1	3,89 – С1	3,78 – С1	3,74 – С1
	1300	4,28 – СМ2	4,07 – С1	4,05 – С1	4,13 – С1	3,90 – СМ2	3,91 – С1
	1320	4,21 – СМ2	4,16 – С1	4,19 – С1	4,01 – С1	4,31 – СМ2	3,81 – С1

Автором также отмечается разрушение зерен электрокорунда белого в черепке, обожженном при температуре 1300–1320 °С подобно тому, как это наблюдается в черепке электрокорунда нормального.

В работе [44] исследовалось влияние термической обработки на свойства абразивного инструмента, изготовленного из белого электрокорунда марки ЕА 50/30М6 и нормального электрокорунда марки ЕВ 50/30М6 (фирмы Treibacher Chemisch Werke, Австрия) на керамической связке состава: 10 % глины по Кранцу, 13 % глины по Жарнову, 47 % полевого шпата по Стеблову и 1 %

Fe_2O_3 с температурой размягчения 1200 °С. Образцы инструмента обжигались при продолжительности нагрева 7 ч и с выдержкой 1 ч при конечной температуре обжига 1200—1340 °С с шагом 20 °С.

В интервале оптимальной температуры обжига абразивных кругов, изготовленных на данной связке (1300—1320 °С) при двухчасовой выдержке при постоянном повышении твердости и прочности, находится также оптимальное значение микротвердости связки как в области контакта связки с зерном, так и на некотором расстоянии от зерна.

Во всех пробах черепок из белого электрокорунда имеет повышенные прочность и твердость по сравнению с черепком из электрокорунда нормального. Замечено также влияние строения абразивного зерна на прочность абразивных кругов.

Проведенные исследования позволили авторам сделать следующие выводы:

обжиг электрокорундовых инструментов должен гарантировать почти полное остекловывание связки (со следами кварцевых реликтов) без возникновения вредной кристаллизации (допускается небольшая кристаллизация шпинели, рутила и муллита на контакте зерна и связки);

модификация связки 5 вес. % оксидами Na_2O и B_2O повышает ее коррозионную активность по отношению к корунду в 2,5 раза, а MoO_3, TiO_2, MgO и CaO — в 2 раза;

модификация связок указанными оксидами имеет значительное влияние на характер и фазовый состав контактного слоя зерно—связка, а также на микротвердость связки, что с эксплуатационной точки зрения имеет огромное значение (сопротивление связки выравниванию зерна);

увеличение содержания Al_2O_3 в связке на 1 % повышает ее микротвердость на 0,025 МПа, а повышение содержания связки в абразивном круге на 1об. % — прочностные свойства изделия на 3,7 %;

микротвердость связки приблизительно на 1/3 выше на контакте с зерном, чем в середине мостика, а точка оптимальной микротвердости в обоих случаях соответствует оптимальной температуре обжига данной связки;

оптимальный срок выдержки изделия при температуре обжига 1300—1320 °С равен 2 ч.

Разработка новых составов связок

Разработка новых керамических связок была, прежде всего, обоснована необходимостью создания инструмента, обеспечивающего работу со скоростью 60 м/с и более, расширением диапазона твердости, номенклатуры кругов и их размеров (в том числе высот). В целях повышения механической прочности абразивного черепка в состав связки вводили дацитовый порфир, вес. %: каолин — 35—20, полевой шпат — 30—10, боросиликатная фритта — 15—20, дацитовый порфир — 20—25 [45].

В абразивную смесь вводят микропорошок М10—М20, и масса имела следующий состав, вес. %: керамическая связка — 7—13,5, жидкое стекло 3,5—4,5, декстрин — 1—2, микропорошок М10—М20 — 3,5—11, абразивное зерно — остальное, что позволило получить механическую прочность на изгиб

обожженного черепка, равную 63–59 МПа, и изготавливать инструмент с рабочей скоростью 70–80 м/с [46].

Керамическая связка имеет состав, вес. %: каолин — 40–95, борная фритта — 4–40, тальк — 1–20 [47].

Для обеспечения стабильности качества борлитиевых связок, расширения интервала появления жидкой фазы связки авторы [48] ввели в состав связки борлитиевую фритту, а для увеличения механической прочности абразивного черепка — криолит, при этом связка имеет следующий состав, вес. %: полевой шпат — 15–60, огнеупорная глина — 0,1–40, литийборосиликатная фритта — 15–60, криолит — 5–15.

Авторами [49] уточнен состав боросиликатной фритты и связки, вес. %: полевой шпат — 40–30, огнеупорная глина (каолин) — 20, борлитиевая фритта — 30–40, криолит — 10, что позволило увеличить прочность абразивного черепка из белого электрокорунда на 10–20 % и обеспечило изготовление абразивного инструмента определенных зернистости и твердости с рабочей скоростью до 80 м/с.

По данным Ф.И. Фрейдлина в табл. 2.35 представлены физико-механические свойства образцов, изготовленных с применением стеклоэмалей (табл. 2.36) (состав связки, вес. %: огнеупорная глина — 30–40, стеклоэмаль — 30–60, полевой шпат — 40).

Анализ данных табл. 2.35 показывает, что высокие показатели прочности получены на образцах со связкой из безгрунтовой эмали БГ (до 42 МПа), что позволяет использовать эту связку для инструмента с рабочей скоростью 80 м/с.

Патенты на стеклокерамические связки, которые можно использовать в качестве связующих для абразивного инструмента, принадлежат в основном фирме Corning Class Works (США) [50–55].

Материал состоит преимущественно из α-кварца и сапфирина $4MgO{\cdot}5Al_2O_3{\cdot}SiO_2$ [50]. Твердость материала по Кнупу — более 800, предел прочности на изгиб — 176–422 МПа. Содержание кристаллической фазы в материале составляет более 75 %. Кристаллическую фазу получают местной кристаллизацией стеклоизделия, состоящего из следующих компонентов, %: оксид магния — 10–16, оксид бора — 0,5–3,5; оксид алюминия — 20–28, диоксид кремния — 44–58, диоксид титана — 3–9 и диоксид циркония — 3–7. Причем суммарное содержание диоксидов титана и циркония должно составлять 8–13.

При варке стекла [51] дополнительно в качестве кристаллизующих добавок могут быть введены оксиды мышьяка и сурьмы в количестве до 2 %. Стеклоизделие проходит тепловую обработку: стадию зародышеобразования при 750–845 °С в течение 1–6 ч и стадию кристаллизации при 875–1100 °С в течение 1–8 ч.

По патенту [52] в состав стеклокерамики входит по крайней мере одна из основных кристаллических фаз, содержащая ориентированные кристаллы, например твердые растворы на основе фторфлогопита; слюду, содержащую щелочно-земельный металл и фтор; производные ортокремниевой кислоты и фторированной слюды, а также фторамфибол. Кристаллы указанных фаз равномерно распределены в матрице из стекла.

По патенту [53] состав стеклокерамики, вес. %: диоксид кремния — 48–75, оксид магния — 5–27, фторид магния — 4–13, оксид алюминия — 0–15,

Таблица 2.35

Физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 40 шестой структуры, 10 вес. ч. связки

Номер связки/марка	Растекаемость связок при температуре 1200 °С, %	Прочность на изгиб, МПа	Степень твердости ГОСТ 18118–79
К5 ПГ	200	35,0	СМ2
ЛК1	190	28,0	СМ2
АК4	200	27,7	СМ2
Грунтовая эмаль 20-15	300	31,3	СМ2
Грунтовая эмаль 31-32	300	34,0	СМ2
Безгрунтовая эмаль БГ	250	42,4	СМ2

Таблица 2.36

Химический состав стеклоэмалей

Фритта	Состав спеклоэмалей, мас. %						
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Li_2O
Стеклоэмаль ЛК1	69,14	4,16	2,03	4,55	–	–	0,90
Стеклоэмаль ЛК4	72,90	3,50	1,80	0,40	–	–	0,08
Грунтовая эмаль 20-15	45,20	6,60	12,0	3,50	–	–	–
Грунтовая эмаль 31-32	45,7	2,0	17,3	3,0	–	–	–
Безгрунтовая эмаль	60,9	0,7	7,9	4,9	–	–	3,1
Фритта	Состав спеклоэмалей, мас. %						
	Na_2O	K_2O	Ni_2O_3	Co_2O_3	MnO_2	TiO_2	F
Стеклоэмаль ЛК1	18,22	–	–	–	–	2,03	4,00
Стеклоэмаль ЛК4	15,18	–	–	–	–	1,78	3,52
Грунтовая эмаль 20-15	18,50	5,00	0,65	0,65	2,10	5,10	0,70
Грунтовая эмаль 31-32	16,0	1,5	0,6	2,0	1,0	5,1	4,8
Безгрунтовая эмаль	13,4	1,8	0,7	1,2	–	2,1	4,8

оксид бария — 0–10, оксид кальция — 0–15, оксид натрия — 4–16 и оксид лития — 3–10.

По патентам [54, 55] керамика состоит, вес. %: диоксид кремния — 52–78,4, оксид алюминия — 12,8–27,5, оксид лития — 2,4–7, оксид цинка — 0,25–6,7, кристаллизующая добавка — 3–9. В качестве добавки применяется смесь диоксидов титана и циркония, причем диоксид циркония составляет 0,25–2,8 вес. %. В состав также можно вводить, вес. %: оксид сурьмы — 0,30 и Fe_2O_3 — 0,45.

По патенту [56] используется керамическое стекло, имеющее предел прочности на разрыв более 70 МПа и состоящее из следующих компонентов, вес. %: диоксид кремния — 55–80, оксид алюминия — 12–27, оксид лития — 3,2–7,6 и кристаллизующая добавка — 3–9.

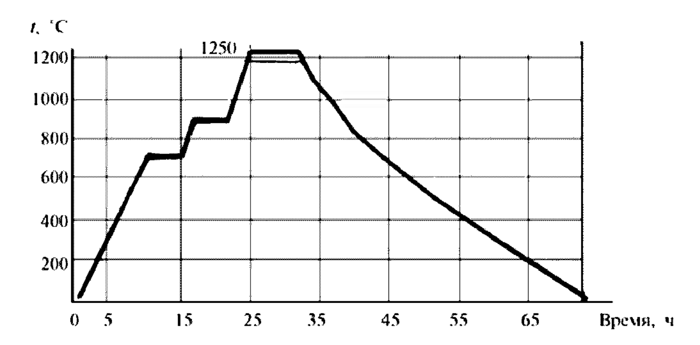


Рис. 2.15. Оптимальный вариант термообработки круга

Автором [57] исследована системы стекол $MgO-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ и $CaO-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$, которые находятся в полях первичной кристаллизации минерала кордиерита и шпинели, TiO_2 вносится как инициатор кристаллизации.

Оптимальный вариант термообработки круга представлен на рис. 2.15. Полученные результаты прочности на изгиб (20 МПа) в зависимости от содержания TiO_2 и вида термообработки подтверждают возможность применения стеклокерамических материалов как связки для абразивных инструментов. Установлено также, что дополнительное включение каолина в состав связки повышает прочность, так как вносится первичная кристаллическая фаза и связанная с термической обработкой каолина "муллитизация".

Получение и использование стеклокристаллических материалов в качестве связки для абразивного инструмента связано с рядом особенностей:

дополнительное влияние на кристаллизационную способность связки за счет повышения концентрации Al_2O_3 в результате растворения корунда связкой (т. е. изменение фазового состава);

использование предварительно ситаллизированной связки не гарантирует сохранения ее первоначальной структуры в процессе формирования абразивного черепка;

требуется специальный режим обжига [58].

Первое применение ситаллов в отечественной практике приводится в работе [59]. Авторы использовали в качестве связок высокопрочные стеклокристаллические материалы — ситаллы (кристаллизующие стекла № 1—2, выпускаемые промышленностью), опытную ситалловую связку и для сравнения связку К5.

Физико-механические свойства образцов из электрокорунда марок 25А40 и 16 представлены в табл. 2.37 (увлажнение формовочной смеси поливинилацетатной эмульсией с добавкой сухого декстрина) и в табл. 2.38 (увлажнение растворимым стеклом).

Из данных табл. 2.37 следует, что образцы на ситалловых связках № 1 и 2 оказались менее прочными по сравнению с контрольными образцами, что объясняется образованием крупных кристаллов в связке в процессе термической обработки.

Таблица 2.37

Физико-механические свойства образцов из белого электрокорунда марки 25А40

Количество связки, вес. ч., на 100 вес. ч. шлифзерна	Температура обжига, °С	Связка	Прочность, МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^7$, МПа	Твердость	
			на разрыв ($\sigma_{разр}$)	на изгиб ($\sigma_{изг}$)		Глубина лунки, мм	По ГОСТ 18118–79
10*	1250	К5	12,6	23,6	57,0	5,10	СМ1
	1250	1	7,7	18,8	42,5	5,20	СМ1
	1250	2	11,3	23,0	51,0	4,80	СМ2
	1250	СТВ	21,8	42,7	68,0	4,90	СМ2
	1275	К5	15,0	27,3	61,1	4,60	СМ2
	1275	1	7,0	20,3	46,5	5,10	СМ1
	1275	2	9,6	19,6	41,2	4,35	СМ2
	1275	СТВ	22,0	44,6	69,0	4,70	СМ2
	1300	К5	15,8	27,8	62,6	4,80	СМ2
	1300	1	5,0	18,6	50,3	4,65	СМ2
	1300	2	9,3	18,4	41,2	4,60	СМ2
	1300	СТВ	21,9	44,5	69,0	4,60	СМ2
15*	1250	К5	14,4	26,2	70,5	3,40	С2
	1250	1	11,1	23,0	60,0	3,20	С2
	1250	2	12,8	27,4	63,0	3,20	С2
	1250	СТВ	22,4	45,0	74,0	3,15	С2
	1275	К5	16,2	30,5	73,1	3,25	С2
	1275	1	10,2	19,7	48,5	3,20	С2
	1275	2	12,5	26,6	64,1	3,40	С2
	1275	СТВ	22,7	45,6	75,6	3,05	СТ1
	1300	К5	16,6	31,4	75,2	3,00	СТ1
	1300	1	9,4	17,4	53,0	3,00	СТ1
	1300	2	10,8	22,1	56,1	3,20	С2
	1300	СТВ	22,9	46,2	78,6	3,00	СТ1
20**	1250	К5	18,1	39,4	80,1	2,05	СТ3
	1250	1	13,9	33,7	75,0	1,80	Т1
	1250	2	15,8	36,5	76,0	1,75	Т1
	1250	СТВ	23,2	51,2	84,0	1,95	СТ3
	1275	К5	18,4	39,6	80,1	1,90	Т1
	1275	1	12,7	29,2	68,2	1,80	Т1
	1275	2	14,8	29,0	71,2	1,80	Т1
	1275	СТВ	23,5	51,2	85,3	1,90	Т1
	1300	К5	Деформация			–	–
	1300	1	10,8	27,0	65,8	1,80	Т1
	1300	2	13,4	27,5	69,3	1,85	Т1
	1300	СТВ	23,3	51,8	84,4	1,80	Т1

* Структура № 6.

** Структура № 5.

Таблица 2.38

Физико-механические свойства образцов из белого электрокорунда

Абразивный материал	Связка	Количество связки и растворимого стекла, вес. ч.	Прочность, МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^{7}$, МПа	Твердость	
			на разрыв ($\sigma_{разр}$)	на изгиб ($\sigma_{изг}$)		Глубина лунки, мм	По ГОСТ 18118–79
25А16	51б(К5)	20/6,5	18,2	50,9	65,2	3,10	СТ2
	СТВ	20/6,5	27,8	64,0	83,6	3,15	СТ2
25А40	51б(К5)	9,7/4,2	15,2	27,3	64,3	4,70	СМ2
	СТВ	8,3/3,5	21,9	14,2	71,1	4,60	СМ2
	51б(К5)	13,6/5,2	16,7	31,6	72,1	2,90	СТ1
	СТВ	12,5/5,6	22,4	45,8	74,8	3,00	СТ1

Значительное (на 40–50 %) повышение прочности образцов на разрыв и изгиб, а также модуля упругости (в среднем на 15 %) достигается при использовании опытной ситалловой связки СТВ. Оно наиболее ярко выражено на относительно мягких изделиях. В некоторых случаях образцы, изготовленные на связке СТВ, получались на одну степень тверже контрольных образцов. Наблюдается повышение и модуля упругости в среднем на 15 % (табл. 2.38).

Экспериментальная проверка эксплуатационных свойств шлифовальных кругов на ситалловой связке СТВ проводилась при круглом (1400 × 32 × 203 24А 40С К6) и плоском (1250 × 20 × 75 24А 40СМ2 К6) шлифовании закаленных сталей (45 и ШХ15) на станках модели 3А1534 и 3Г71 при следующих режимах:

для круглого наружного шлифования — $v_{кр}$ = 35 м/с, $v_{дет}$ = 28 м/мин, $s_{кр}$ = = 2 м/мин, t = 0,02 мм/ход (режим 1) и t = 0,01 мм/ход (режим 2);

для плоского шлифования — $v_{кр}$ = 35 м/с, $v_{дет}$ = 13 м/мин, $s_{поп}$ = 4 мм/ход, t = 0,02 мм (режим 1) и $s_{поп}$ = 2 мм/ход, t = 0,015 мм (режим 2).

При шлифовании закаленных сталей (45 и ШХ15) стойкость кругов на ситалловой связке СТВ в среднем на 40 % выше стойкости инструмента на стекловидной связке К5 [60]. Например, при шлифовании закаленной стали (45) со скоростью 60 м/с на круглошлифовальном станке 3А153У стойкость круга увеличивается в 1,5 раза, износ его уменьшился в 1,8 раза, а частота шероховатости поверхности повысилась на один класс.

Разработка керамических связок для легированных корундов

Изучение взаимодействия легированных электрокорундов с керамическими связками проводилось Н.Е. Филоненко, О.С. Кузнецовой, Г.М. Зарецкой с применением микроскопического анализа образцов после термической обработки в иммерсии на полированных шлифах, а также методами химического, спектрального, люминесцентного на рентгенографического анализов. Было установлено, что в титанистом электрокорунде в процессе термической обработки происходит распад твердого раствора титана (до 60 % введенного в корунд при плавке), который при охлаждении выкристаллизовывается, что умень-

шает прочность связки. Исходя из этого, Н.Е. Филоненко рекомендовала для титанистого электрокорунда связки с содержанием Na_2O не более 5 %. Хромистый электрокорунд по данным рентгеноструктурного анализа в процессе термической обработки почти не претерпевает изменений в отличие от белого и титанистого электрокорундов, заметно меньше растворяющихся керамическими связками (К1, К8, К5 и 5). Реакционная способность связок по отношению к хромистому электрокорунду также ниже, чем к белому и титанистому, следовательно, ниже и механические свойства абразивных черепков.

Разработанная связка К6 [61] позволила несколько повысить физико-механические свойства черепка, однако свойства инструмента на этой связке не отличаются стабильностью и производство кругов на ней имеет более высокий брак по сравнению с инструментом, изготавливаемым на связке К5.

Ю.Ф. Юликовой с сотрудниками [62] продолжена работа по изучению взаимодействия шлифзерна легированных электрокорундов с керамическими связками. Для выявления участия легирующих оксидов в процессе взаимодействия были предложены специальные показатели, позволяющие количественно оценить переход оксидов в связку при обжиге.

Исследовали образцы инструментов из хромистого, титанистого и хромтитанистого, а также из белого электрокорундов (для сравнения), изготовленных на керамических связках марок К5, К6, К43 и К153, различающихся химическим составом и огнеупорностью. Химический состав электрокорундов, использованных для изготовления инструмента, приведен в табл. 2.39.

Обжиг образцов инструментов производился при максимальной температуре 1250 °С с выдержкой в течение 2 ч. После измерения твердости и прочностных характеристик обожженных образцов проводили их химический анализ. Путем обработки смесью фтористоводородной, хлорной и азотной кислот связку отделяли от зерна и затем определяли в ней содержание Al_2O_3, TiO_2 и Cr_2O_3 [62].

Кроме того, в шлифзерне после отделения связки определяли содержание легирующих оксидов в твердом растворе корунда методом эмиссионного спектрального анализа.

На основании результатов анализов рассчитывали относительный прирост связки в черепке за счет растворения абразивного зерна, относительное коли-

Таблица 2.39

Химический состав образцов электрокорундов

Марка шлифматериала, зернистость (завод-изготовитель)	Химический состав							
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	Cr_2O_3	TiO_2
24А, 40 (№ 1)	99,68	0,04	0,02	0,19	0,03	0,04	–	–
33А, 40 (№ 2)	98,97	0,08	0,04	0,23	0,03	0,02	0,83/0,69	–
37А, 40 (№ 2)	97,90	0,06	0,04	0,30	0,03	0,02	–	1,90/1,33
91 А, 40 (№ 2)	98,17	0,08	0,05	0,19	0,03	0,06	0,63/0,52	0,80/0,52

Примечание. В числителе приведена валовая доля компонентов, в знаменателе — она же в твердом растворе.

чество оксида алюминия, растворенного связкой, а также относительное (к содержанию в зерне) количество легирующего оксида RO, растворенного связкой, по формуле

$$K_{RO} = \frac{[RO]_э - [RO]_0 - П_{RO}}{[RO]_{0,3}} 100\,\%,$$

где $[RO]_э$ — экспериментально найденное содержание легирующего оксида RO в связке, выделенной из образца, % к массе черепка; $[RO]_0$— та же величина, рассчитанная исходя из химического состава связки и шихтового состава сырца (при отсутствии в исходной связке оксида $[RO]_0 = 0$); $[RO]_{0,3}$ — массовая доля легирующего оксида в шлифзерне, % к массе черепка; $П_{RO}$ — поправка на переход в раствор некоторого количества легирующего оксида при химической обработке образца,

$$П_{RO} = B \cdot C_{RO}/100$$

(B — расчетное количество шлифзерна в инструменте, C_{RO} — относительное количество оксида, переходящее в раствор после обработки кислотами шлифзерна, прокаленного при 1250 °С, % к массе черепка).

В табл. 2.40 приведены показатели, позволяющие оценить характер взаимодействия шлифзерна исследуемых электрокорундов с керамическими связками и физико-механическими характеристиками образцов инструмента.

Таблица 2.40

Показатели реакционной способности связок и физико-механические характеристики образцов на их основе

Характеристика образца абразивного материала		Показатели реакционной способности связки				Физико-механические характеристики образцов	
Марка и зернистость	Марка керамической связки	Относительный прирост связки, отн. %	Относительные (к содержанию в зерне) количества растворенных связкой компонентов, отн. %			Твердость по ГОСТ 1811–79	Предел прочности, МПа
			Al_2O_3	Cr_2O_3	TiO_2		
24А 40	К5	2,5	0,1	–	–	С2	16/30
	К6	5,6	0,1	–	–	С2	15/30
	К43	6,1	1,2	–	–	С2	21/44
	К153	7,8	1,3	–	–	С2	18/37
33А 40	К5	2,0	0,1	–	2,1	С2	12/31
	К6	7,1	0,8	–	16,1	С2	13/33
	К43	5,5	0,5	–	3,8	С2	20/42
	К153	10,9	1,0	–	14,6	С2	21/46
37А 40	К5	3,5	1,4	1,0	–	С2	12/24
	К43	4,4	1,6	2,1	–	С2	15/30
91А 40	К5	4,4	0,3	8,2	3,1	С2	14/34
	К6	4,7	0,8	0,1	4,7	С2	13/29
	К43	7,2	0,9	4,7	2,0	С2	19/41
	К153	13,9	1,9	4,1	3,4	С2	22/46

Примечание. В числителе приведен предел прочности при разрыве, в знаменателе — при изгибе.

Данные табл. 2.40 свидетельствуют, что при обжиге абразивного инструмента, изготовленного из шлифзерна легированных электрокорундов, происходит растворение керамическими связками легирующих оксидов в количестве, не соответствующем количеству растворенного корунда, что говорит о взаимодействии с керамической связкой легирующих оксидов, не образующих твердого раствора в структуре корунда.

Это подтверждают данные табл. 2.41, показывающие, что керамические связки К5 и К6 практически не изменяют содержания оксидов хрома и титана, образующих твердый раствор в корунде. Вместе с тем реакционно-активные связки (К43 и особенно К153) не только взаимодействуют со свободными оксидами легирующих элементов, но и частично извлекают их из твердого раствора корунда.

Из данных табл. 2.41 также видно, что наибольшее количество оксида хрома переходит из шлифзерна хромистого и хромтитанистого электрокорундов в связки К6 и К153, содержащие в своем составе оксид бария. Причиной этого, по мнению авторов, является то, что в окислительной среде при обжиге инструментов оксид хрома, переходящий в связку из зерна, взаимодействует с оксидом бария связки с образованием термодинамически прочного соединения — хромата бария.

Это позволяет рекомендовать при изготовлении инструментов из хромистого электрокорунда связку К6, а для изготовления скоростного инструмента из хромтитанистого электрокорунда — связку К153.

Особенности фазового состава и распределение фаз в корунде и мостиках связки абразивного черепка в зависимости от температуры и продолжительности обжига были изучены также микроскопическим методом [63]. Анализ об-

Таблица 2.41

Результаты определения содержания легированных оксидов в твердом растворе корунда

Характеристика образцов шлифзерна	Содержание в твердом растворе		Уменьшение содержания в твердом растворе при термообработке инструмента, отн. % *	
	Cr_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	TiO_2
33А 40, исходное, прокаленное при $T = 1250$ °С и обработанное кислотами	0,69	–	–	–
33А 40, выделенное из черепка на связке К5	0,69	–	–	–
33А 40, выделенное из черепка на связке К153	0,66	–	4,3	–
91А 40, исходное, прокаленное при $T = 1250$ °С и обработанное кислотами	0,52	0,52	–	–
91А 40, выделенное из черепка на связке К5	0,52	0,51	–	1,9
91А 40, выделенное из черепка на связке К6	0,52	0,51	–	1,9
91А 40, выделенное из черепка на связке К43	0,51	0,50	1,9	3,8
91А 40, выделенное из черепка на связке К153	0,46	0,42	11,5	17,3

* Относительно содержания в исходном шлифзерне, прокаленном при $T = 1250$ °С и обработанном кислотами.

разцов в аншлифах и иммерсионных препаратах в отраженном и проходящем свете позволил установить протекание следующих физико-химических процессов в корунде и связках абразивных черепков при термообработке.

По мере увеличения температуры и продолжительности выдержки характер распределения связки в черепке постоянно изменяется. Если в образце, обработанном при температуре 1250 °С в течение 1 ч, связка образует многочисленные узкие мостики, то при температуре 1310 °С и выдержке 9 ч она образует широкие сплошные перемычки между зернами корунда. Уже в процессе нагрева образцов до 1250 °С и выдержке в течение 1 ч происходит насыщение стекла глиноземом, о чем свидетельствует постоянный для всех связок и не меняющийся с увеличением температуры до 1310 °С и продолжительности выдержки до 9 ч показатель преломления стекла (1,492–1,495 против 1,470–1,480 в исходном стекле).

Однородность стекловатой составляющей несколько повышается за счет усвоения зерен кварца, которые при 1250 °С еще наблюдаются в виде единичных реликтов. В контакте зерно корунда — связка в образцах на связках 5 и 6 (содержание MgO — примерно 3–3,5 %) при 1250 °С наблюдается образование корки шпинели, которая при увеличении температуры до 1310 °С и продолжительности выдержки до 3–9 ч кристаллизуется на некотором удалении от контакта либо вовсе отсутствует. Во всех черепках уже при температуре обжига 1250 °С наблюдается перерождение β-глинозема $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$, содержащегося в зернах корунда в виде включений, в тонкопластинчатые агрегаты корунда за счет частичного улетучивания Na_2O [64]. Дальнейшее повышение температуры обжига до 1310 °С и времени выдержки до 9 ч приводит к полному перерождению агрегатов пластинок β-глинозема в агрегаты кристаллов корунда. Этот процесс охватывает при выдержке 1 ч края корундовых зерен, а при 9-часовой выдержке — и их внутренние части. В черепках на связках 5 и 431 от зерен корунда отторгаются в связку развившиеся за счет β-глинозема вторичные кристаллы (рис. 2.16). Находящиеся в виде включений в кристаллах корунда соединения титана в образцах из титанистого и хромтитанистого электрокорундов в процессе обжига окисляются до TiO_2 и как вторичный корунд нередко проникают в мостики связки.

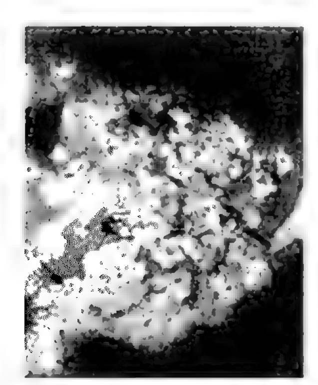


Рис. 2.16. Агрегаты пластинчатых кристаллов корунда и "почки" (белый цвет) кристаллов рутила в мостике связки (серый цвет) (свет отраженный, увеличение ×200)

При термообработке в указанном температурном интервале постепенно изменяется окраска корундовых зерен в образцах из титанистого и хромтитанистого электрокорундов: корунд в титанистом электрокорунде утрачивает коричневый цвет, становится полупрозрачным и непрозрачным, молочно-синим. Корунд в образцах из хромтитанистого электрокорунда в процессе обжига становится все более розовым, постепенно утрачивая коричневый тон. Уже начиная с температуры 1250 °С внутри кристаллов корунда в этих образцах в иммерсионном препарате наблюдает-

ся тончайшая сетка высокопреломляющих кристаллов, которые, как правило, образуют три системы субпараллельно расположенных игл. Эта картина наблюдалась в титанистом электрокорунде [65] и была истолкована как следствие частичного распада твердого раствора Ti^{+3} в Al_2O_3 и окисления Ti^{+3} до Ti^{+4} с кристаллизацией игл TiO_2 в форме рутила по плоскостям спайности корунда (по ромбоэдру). Наблюдение изменения этой картины в аншлифах и иммерсионных препаратах во времени в сочетании с определением концентрации твердых растворов рентгеновским и спектральным методами позволило проследить кинетику этого процесса. При нагреве до температуры 1250 °С и выдержке в течение 1 ч кристаллы рутила образуют сетку (толщина кристаллов — менее 1 мкм), которая локализуется главным образом в краях корундовых зерен. При повышении температуры и продолжительности выдержки кристаллы рутила растут, достигая длины 10 мкм и толщины примерно 1 мкм при 1310 °С и выдержке в течение 9 ч (рис. 2.17). По данным спектрального анализа содержание Ti^{+3} в твердом растворе в корунде при этом понижается от 0,8–0,9 до 0,3–0,4 вес. %. Значение Δd кристаллической решетки корунда, определенное рентгеновским методом, уменьшается при повышении температуры и длительности выдержки, что также свидетельствует о снижении концентрации твердого раствора Ti^{+3} в корунде (Δd изменяется от 0,83078–0,83081 до 0,83063–0,83075 А).



Рис. 2.17. Кристаллизация рутила в зерне корунда вследствие распада твердого раствора Ti^{+3} в корунде (свет проходящий, увеличение ×400)

Эти наблюдения позволяют сделать вывод об углублении процесса распада твердого раствора Ti^{+3} при термообработке, окислении Ti^{+3} до Ti^{+4} и при развитии собирательной рекристаллизации рутила с ростом отдельных его индивидов. Располагаясь субпараллельно вдоль плоскостей ромбоэдров в корунде, кристаллы рутила усиливают природную способность корунда раскалываться по определенным плоскостям — его спайность по ромбоэдру. Эта способность определяет самозатачиваемость зерна в работающем инструменте. При максимальных (в диапазоне изученных) температурах и выдержках происходит "выход" рутила в связку, при этом разные связки по-разному "вытягивают" рутил из корунда: наиболее активны связки 5 и 431 (рис. 2.18).

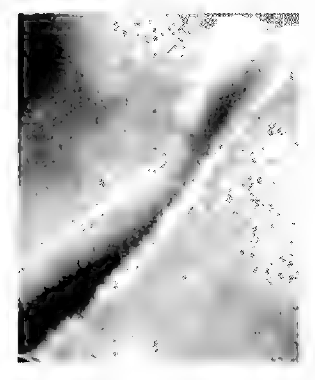


Рис. 2.18. "Щетка" кристалла рутила (белый цвет) в контакте зерен корунда со связкой (свет отраженный, увеличение ×300)

В черепках из хромистого электрокорунда в процессе термической обработки окраска рутила практически не изменяется. Ни в зернах корунда, ни в самой связке не появляется новооб-

разований, связанных с распадом твердого раствора Cr^{+3} в корунде. Спектральный метод также не обнаруживает изменения концентрации Cr^{+3} в твердом растворе в корунде при термообработке черепка.

Рентгеновский метод устанавливает даже некоторое увеличение содержания Cr^{+3} в структуре корунда с увеличением температуры и продолжительности выдержки.

Прослеженные тенденции поведения твердых растворов Cr^{+3} и Ti^{+3} в корунде позволяют объяснить изменение окраски корундовых зерен: по мере выпадания из структуры корунда титана Ti^{+3} окраска зерен корунда становится все более обусловленной присутствием хрома (в хромтитанистом электрокорунде) либо они теряют прозрачность, окрашиваясь в голубой цвет, как это обычно происходит в Ti-содержащих электрокорундах — титанистом и нормальном [66].

Таким образом, продолжительная (3–9 ч) высокотемпературная (1280–1310 °С) обработка инструмента из легированных электрокорундов приводит к глубокому распаду твердого раствора титана в корунде, к кристаллизации рутила и собирательной рекристаллизации его игл, образующих субпараллельные скопления по плоскостям ромбоэдров в корунде, к перерождению высокоглиноземистого алюмината натрия во вторичный корунд, к окислению Ti-содержащих сопутствующих корунду фаз и проникновению новообразований в виде рутила и вторичного корунда в стекло мостиков связки. Эти факторы влияют на механическую прочность и работоспособность абразивного инструмента, и их необходимо учитывать при выборе оптимальных условий его обжига.

Влияние параметров режима термической обработки на концентрацию твердых растворов в легированных электрокорундах и на окраску абразивного инструмента, изготовленнного из них, изучено в работе [67]. Изучали влияние температуры, времени выдержки при максимальной температуре обжига и состава газовой среды на окраску шлифовальных зерен 33А 40, 37А 40 и 91А 40 и брусков, изготовленных из шлифзерна 33А на связках К5, К6, 431 и из шлифзерна 37А и 91А на связках К1, К5, 431. Содержание хрома и титана определяли спектральным методом и рентгенометрически по значениям межплоскостного расстояния d_{416} кристаллической решетки корунда по специальным методикам. Чувствительность рентгенометрического определения значений $d_{416} = 5 \cdot 10^{-6}$ Å. Исследовали средние пробы шлифзерна в исходном виде и после обжига при 1280 °С с выдержкой в течение 9 ч в электрической печи в окислительной (воздушной) среде, а также бруски из зерна 40 указанных марок на перечисленных связках, обожженные при температурах 1250, 1280 и 1310 °С с выдержкой 1, 3 и 9 ч в воздушной среде и при 1280 °С с выдержкой 3 ч — в восстановительной. Для проведения спектрального и рентгеновского анализов средние пробы растирали в порошки до крупности частиц 50 мкм. Окраску брусков оценивали визуально; окраску свободного зерна наблюдали в микроскопе типа МБС-1.

По полученным данным окраска и параметры решетки корунда в свободном зерне марки 33А после обжига изменились незначительно ($\Delta d_{416} \cong 2 \cdot 10^{-5}$ Å), что соответствует незначительному изменению концентрации твердого раствора хрома в корунде (примерно 0,1 %) (табл. 2.42).

Таблица 2.42

Влияние температуры обжига на содержание Cr_2O_3 в твердом растворе хромистого электрокорунда марки 33А40 и на окраску абразивного инструмента из него

Вид образца	Условия обжига		Связка							
	Температура, °С	Время выдержки, ч	Связки нет		К5		К6		К43	
			Окраска образца	Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. % *	Окраска образца	Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. % *	Окраска образца	Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. % *	Окраска образца	Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. % *
Зерно 33А 40	–	–	Малиновая, розовая	0,65	–	–	–	–	–	–
	1280	9		0,55	–	–	–	–	–	–
Брусок	1250	1	–	–	Розово-сиреневая	0,55	Розово-сиреневая	0,57	Сиренево-малиновая	0,57
	1250	3	–	–		0,45		–	Малиновая	0,68
	1250	9	–	–		0,50		0,55		0,55
	1280	1	–	–		0,53		–		0,52
	1280	3	–	–		0,53	Малиновая	0,68		0,48
	1280	3**	–	–	Малиновая	0,57		0,57		0,73
	1280	9	–	–	Розово-сиреневая яркая	0,50		0,60		0,53
	1310	1	–	–	–	0,48		0,59		0,52
	1310	3	–	–	–	0,40		0,55		0,55
	1310	9	–	–	–	0,56	Малиново-сиреневая	0,70		0,68

* — определено по значению d_{416} корунда в допущении, что оно изменяется только с изменением количества растворенного Cr_2O_3.

** — среда восстановительная.

Окраска брусков после обжига также практически не изменилась, концентрация твердого раствора хрома варьируется в пределах ±0,1 % по отношению к исходной.

Окраска зерен электрокорунда марки 37А в процессе обжига изменяется существенно: зерна утрачивают коричневый оттенок и приобретают сине-голубой цвет. Это обусловлено окислением титана до TiO_2, выходом его из структуры корунда и кристаллизацией в виде рутила. В свободном зерне и в инструменте из зерна 37А 40 с повышением температуры обжига и выдержки в окислительной среде концентрация твердого раствора титана в корунде снижается (табл. 2.43).

Однако в инструменте под влиянием керамической связки этот процесс замедляется, особенно при применении связки К1, характеризующейся повышенным содержанием оксидов железа, а также в брусках на всех исследованных связках, обожженных в восстановительной среде. В брусках, обожженных в окислительной среде при 1310 °С с выдержкой 9 ч, параметры решетки корунда существенно уменьшались по сравнению с исходными: $\Delta d_{416} \cong (1-2)10^{-4}$ А. Отмеченное уменьшение концентрации твердого раствора титана в корунде проявляется в изменении окраски черепка: светлые тона черепков, обожженных при 1310 °С, указывают на активный распад твердого раствора титана в корунде при данной температуре. Известно [66], что частичный распад твердого раствора титана в корунде, проходящий на глубину 35—40 мкм с выделением в контактной зоне зерно—связка тончайших закономерно ориентированных игл рутила TiO_2, обеспечивает повышенную режущую способность инструмента. Однако более полный распад твердого раствора, обусловленный более высокой температурой обжига, снижает эксплуатационные показатели, как это следует из комплекса работ, выполненных в данном направлении. Следовательно, температура обжига более 1280 °С для инструмента из зерна 37А 40 нежелательна.

Зерно сложнолегированного электрокорунда марки 91А отличается наибольшей неоднородностью окраски как в исходном состоянии, так и после обжига; при этом в обожженном зерне концентрация хрома в твердом растворе сохраняется практически неизменной, тогда как концентрация титана существенно уменьшается. Соответственно окраска зерен после обжига остается малиново-розовой (для хромсодержащих зерен) либо из коричнево-черной переходит в опаловую и голубую (для зерен, богатых растворенным титаном). Отметим, что концентрация хрома в твердом растворе в зерне электрокорунда 91А существенно выше, чем в зерне 33А, при большем валовом содержании Cr_2O_3 в зерне 33А (1,1 %) по сравнению с зерном 91А (0,8 %), что подтверждают данные работы [68] о более полном вхождении легирующих добавок в твердый раствор в сложнолегированном электрокорунде марки 91А. В обожженных брусках из зерна 91А в зависимости от состава связки концентрация хрома и титана в твердом растворе изменялась по-разному. Так, в брусках на связке К431 содержание хрома в твердом растворе снизилось весьма незначительно, тогда как содержание титана, растворенного в корунде, существенно уменьшилось (табл. 2.44).

Бруски из электрокорунда марок 37А и 91А, изготовленные на всех указанных связках и обожженные в восстановительной среде, при прочих равных

Таблица 2.43

Влияние температуры обжига на содержание TiO_2 в твердом растворе титанистого электрокорунда марки 37А 40 на окраску абразивного инструмента из него

<table>
<tr><th rowspan="3">Вид образца</th><th colspan="2">Условия обжига</th><th colspan="8">Связка</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Температура, °С</th><th rowspan="2">Время выдержки, ч</th><th colspan="2">Связки нет</th><th colspan="2">К1</th><th colspan="2">К5</th><th colspan="2">К43</th></tr>
<tr><th>Окраска образца</th><th>Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. %*</th><th>Окраска образца</th><th>Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. %*</th><th>Окраска образца</th><th>Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. %*</th><th>Окраска образца</th><th>Содержание Cr_2O_3 в твердом растворе, мас. %*</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Зерно 37А 40</td><td>–</td><td>–</td><td>Коричневая, светло-коричневая, розовая, зелено-коричневая</td><td>0,98</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td></tr>
<tr><td>1280</td><td>9</td><td>Сине-голубая, зерна непрозрачные</td><td>0,58</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td></tr>
<tr><td rowspan="11">Брусок</td><td>1250</td><td>1</td><td>–</td><td>–</td><td rowspan="5">Серо-горчичная</td><td>0,95</td><td>Темно-серая</td><td>0,99</td><td>Темно-серая</td><td>0,84</td></tr>
<tr><td>1250</td><td>3</td><td>–</td><td>–</td><td>0,83</td><td>Темно-серо-синяя</td><td>0,82</td><td>Серо-синяя</td><td>0,81</td></tr>
<tr><td>1250</td><td>9</td><td>–</td><td>–</td><td>0,75</td><td>Синяя</td><td>0,74</td><td>Синяя</td><td>0,72</td></tr>
<tr><td>1280</td><td>1</td><td>–</td><td>–</td><td>0,95</td><td>Темно-серо-синяя</td><td>0,81</td><td>Темно-серая</td><td>0,85</td></tr>
<tr><td>1280</td><td>3</td><td>–</td><td>–</td><td>0,75</td><td>Синяя</td><td>0,72</td><td>Сине-голубая</td><td>0,75</td></tr>
<tr><td>1280</td><td>3**</td><td>–</td><td>–</td><td rowspan="3">Серая</td><td>0,78</td><td>Зелено-серая</td><td>0,81</td><td rowspan="2">Темно-серая</td><td>0,81</td></tr>
<tr><td>1280</td><td>9</td><td>–</td><td>–</td><td>0,65</td><td>Голубая</td><td>0,64</td><td>0,73</td></tr>
<tr><td>1310</td><td>1</td><td>–</td><td>–</td><td>0,68</td><td>Серо-синяя</td><td>0,69</td><td rowspan="2">Серая</td><td>0,77</td></tr>
<tr><td>1310</td><td>3</td><td>–</td><td>–</td><td>Серо-песочная</td><td>0,65</td><td>Сине-голубая</td><td>0,67</td><td>0,61</td></tr>
<tr><td>1310</td><td>9</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td>0,66</td><td>Светло-серо-голубая</td><td>0,59</td><td>Белая, светло-серо-голубая</td><td>0,47</td></tr>
</table>

* — определено по значению d_{416} корунда в допущении, что оно изменяется только с изменением количества растворенного TiO_2.

** — среда восстановительная.

Таблица 2.44

Влияние температуры обжига на содержание Cr_2O_3 и TiO_2 в твердом растворе хромтитанистого электрокорунда марки 91А 40 и на окраску абразивного инструмента

Вид образца	Условия обжига		Связка					
	Температура, °С	Время выдержки, ч	Связки нет		К5		К43	
			Окраска образца	Содержание в твердом растворе, мас. %*	Окраска образца	Содержание в твердом растворе, мас. %*	Окраска образца	Содержание в твердом растворе, мас. %*
Зерно 91А 40	–	–	Коричневая, светло-коричневая, малиновая, розовая, черная, белая, голубая	0,63/0,80 **	–	–	–	–
	1280	9	Малиновая, розовая, опаловая, голубая	0,60/0,67 **	–	–	–	–
Брусок	1250	1	–	–	Темно-фиолетово-серая	0,57/0,75	Фиолетово-серая	0,59/0,82
	1250	9	–	–	Темно-серо-сиреневая	0,53/0,57	Фиолетово-светло-серая	0,57/0,66
	1310	9	–	–	Сиренево-розовая	0,50/0,50	Серо-голубая	0,56/0,49

* По данным спектрального анализа.

** В числителе приведены данные для Cr_2O_3, в знаменателе – для TiO_2.

условиях имеют более темную окраску, чем бруски, обожженные в воздушной среде. При обжиге в воздушной среде с добавлением паров воды, а также в пламенной туннельной печи, отапливаемой природным газом, в окислительной среде окраска образцов получается более светлой, чем у брусков, обожженных в электрической печи в воздушной среде.

Опыты показали, что в абразивных изделиях керамические связки разного химического состава по-разному влияют на распад твердого раствора титана в корунде марок 37А и 91А, вследствие чего их окраска после обжига в идентичных условиях оказывается различной.

На основании результатов комплексных исследований можно рекомендовать инструмент из хромистого электрокорунда марки 33А, изготовленный на связке К6, подвергать термической обработке в условиях, обеспечивающих его интенсивную малиновую окраску; условия термической обработки инструмента из титанистого электрокорунда марки 37А, изготовленного на связке К1, содержащей оксиды железа, должны обеспечивать серо-горчичную окраску, а на связках К5 и К43 — синюю и сине-голубую; условия обжига инструмента из сложнолегированного электрокорунда марки 91А должны обеспечивать сиреневo-розовую окраску на связке К5 и серо-голубую — на связке К43.

Проведенная работа показала, что цвет инструмента из легированных электрокорундов марок 37А и 91А после обжига является достаточно чувствительным индикатором происшедших изменений концентрации легирующих добавок в твердом растворе в корунде. Он может характеризовать однородность термообработки по объему инструмента и стабильность условий обжига. Таким образом, возможен визуальный технологический контроль процесса обжига инструмента.

Основываясь на исследованиях взаимодействия керамических связок с легированными электрокорундами в процессе термической обработки, Ю.Ф. Юликова с сотрудниками разработала ряд новых связок для изготовления скоростного инструмента из этих материалов. В табл. 2.45 представлены шихтовые составы и свойства исследуемых связок, в табл. 2.46 — рецептура формовочных смесей для изготовления абразивных образцов, в табл. 2.47 и на рис. 2.19 — физико-механические свойства образцов из хромтитанистого электрокорунда на новых связках по сравнении со связкой К11, применяемой в промышленности. В табл. 2.48 — разрывная и рабочая скорости кругов, изготовленных из хромтитанистого электрокорунда марки 91А 40—25.

Данные табл. 2.47 и 2.48 позволили авторам [69] разработать новую марку связки состава, %: хромтитанистый электрокорунд — 69,0—90,0, огнеупорная глина (каолин) — 1,4—5,0, полевой шпат — 0,7—2,5, борлитийсиликатная фритта — 2,1—7,5, жидкое стекло — 3,0—6,0, которая обеспечивает работу кругов из хромтитанистого электрокорунда со скоростью до 75 м/с, а также рекомендовать для освоения в промышленности новые связки, например 153-1, 153К (табл. 2.49).

На рис. 2.20 представлены микроструктуры образцов на связках К153 и К11. Шлифовальные круги на связках К153 при обработке сложнолегированных сталей показывают повышенные производительность и коэффициент шлифования.

Таблица 2.45

Шихтовые составы и свойства исследуемых связок

Характеристика	Состав связки, мас. %, марки					
	11	11Л	18Л	43	153–1	153К
Шихтовой состав						
Каолин (огнеупорная глина)	30	30	30	20	20	20
Полевой шпат	40	40	40	40	20	10
Фритта борсиликатная	30	–	–	–	–	–
Фритта борлитийсиликатная	–	30	–	30	30	30
Стекло барийсиликатное	–	–	–	–	30	30
Криолит	–	–	5	10	–	10
Свойства связок						
Огнеупорность, °C	1200	1180	1115	880	950	850
Растекаемость, %	215	200	210	282	285	294
Угол смачивания при температуре 1250–1300 °C	80	60	50	–	18	23
Реакционная способность, %	15,8	–	–	40,4	46,0	67,0
Показатель преломления при температуре 1250 °C	1,480	1,491	1,491	1,493	1,495	1,500
Микроструктура связки, обожженой при 1250 °C в течение 1 ч	Вязкое стекло, содержащее агрегаты муллита и муллитизированной глины	Вязкое стекло, с агрегатами муллита и муллитизированной глины	Стекло, содержащее незначительное количество не до конца проплавившихся исходных компонентов	Однородное по составу бесцветное стекло	Бесцветное прозрачное стекло, однородное по цвету, минералообразований не наблюдается	Бесцветное прозрачное стекло, однородное по цвету, минералообразований не наблюдается

Таблица 2.46

Рецептура формовочной смеси для изготовления образцов

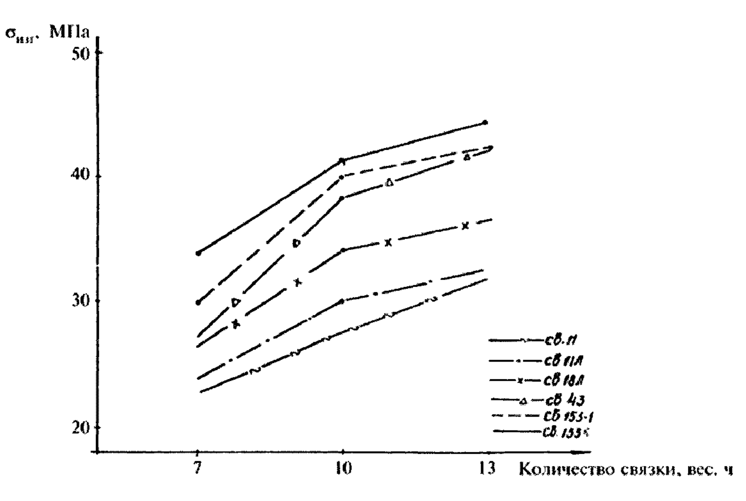
Компонент формовочной смеси	Смесь, мас. %		
	Рецепт 1	Рецепт 2	Рецепт 3
Шлифзерно	100	100	100
Керамическая связка	7	10	13
Сухой декстрин	2,0	1,5	1,0
Жидкое стекло	3,5	4,0	4,5
Структура	7	6	5
Объемный вес, г/см^3	2,13	2,28	2,43

Таблица 2.47

Физико-механические свойства образцов, изготовленных из хромтитанистого электрокорунда на исследуемых связках

Марка связки	Количество связки на 100 массовых долей шлифматериала	Предел прочности свежезаформованного образца на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа	Предел прочности, МПа		Твердость по ГОСТ 18118–79
			на разрыв ($\sigma_{разр}$)	на изгиб ($\sigma_{изг}$)	
91А 40					
11	7	0,036	8,2	22,7	М2
	10	0,042	11,2	27,4	СМ2
	13	0,044	12,2	31,8	СТ1
11Л	7	0,033	7,4	22,0	М2
	10	0,039	12,3	30,0	С1
	13	0,042	12,5	32,5	СТ1
18Л	7	0,037	8,1	26,2	М1
	10	0,039	10,5	35,1	СМ2
	13	0,041	12,0	37,5	С2
43	7	0,030	11,5	27,0	М3
	10	0,037	13,6	38,3	С1
	13	0,041	15,1	42,0	СТ1
153-1	7	0,032	12,2	29,8	СМ1
	10	0,040	14,1	39,8	С1
	13	0,039	15,3	42,1	СТ2
153К	7	0,030	13,1	33,7	СМ1
	10	0,038	15,4	41,4	С1
	13	0,040	16,5	44,7	СТ1
91А 25					
11	7	0,039	10,0	23,6	СМ2
	10	0,044	12,2	34,2	С2
	13	0,046	13,8	39,0	СТ3
153-1	7	0,033	11,0	27,6	СМ2
	10	0,041	14,0	42,2	С2
	13	0,042	16,8	46,4	Т1
153К	7	0,032	12,0	31,8	СТ1
	10	0,040	14,3	46,1	СТ1
	13	0,041	17,8	48,5	СТ3





б)

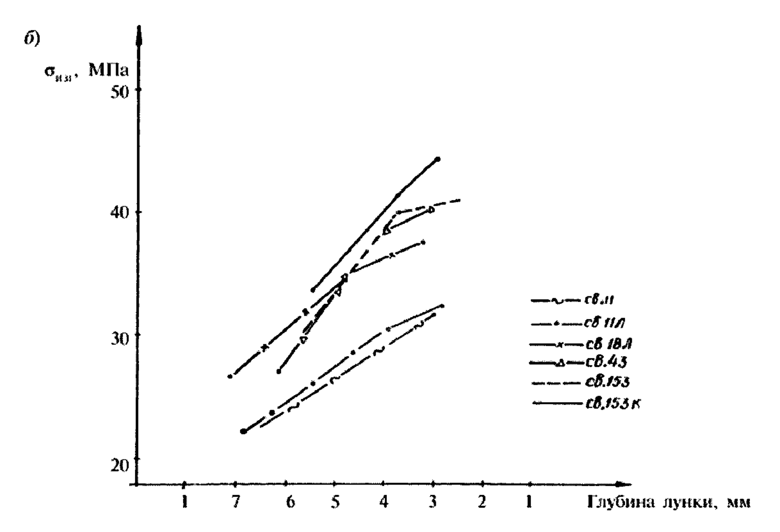


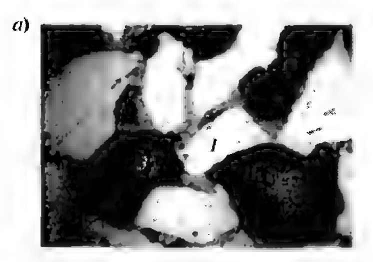
Рис. 2.19. Зависимость предела прочности на изгиб образцов из электрокорунда марки 91А 40 от количества связки (*а*) и от твердости образцов (*б*)

Таблица 2.48

Разрывная и рабочая (расчетная) скорости кругов, изготовленных из хромтитанистого электрокорунда марки 91А 40–25

Марка связки	Наименование скорости вращения круга	Разрывная скорость, м/с, образцов зернистостью					
		40			25		
		Номер структуры (твердость по ГОСТ)					
		7 (СМ1)	6 (С1)	5 (СТ1)	8 (СМ1)	7 (С1)	6 (СТ1)
11	Разрывная	98,8	107,5	102,3	109	112,6	102,5
	Рабочая расчетная	58	63	60	64	66	60
153-1	Разрывная	110,8	124,4	115,8	120,8	124,2	119,2
	Рабочая расчетная	65	73	68	71	73	70
153-К	Разрывная	122,4	125,6	120,2	133,6	131,2	128,4
	Рабочая расчетная	72	75	70	78	77	75

а)



б)



Рис. 2.20. Микроструктура черепков на связках:
а – 153К; *б* – 11 (свет отраженный, увеличение ×100); *1* – зерно; *2* – связка; *3* – поры

Таблица 2.49

Свойства керамических связок для инструмента из хромтитанистого электрокорунда марки 91А и рекомендуемые характеристики инструмента

Марка связки	Свойства связок			Физико-механические свойства образцов			Рекомендуемая характеристика инструмента	
	Огнеупорность, °С	Показатели реакционной способности, %		Степень твердости	Прочность, МПа		Степень твердости по ГОСТ 18118–79	Рабочая скорость, м/с
		Относительный прирост связки	Относительное количество Al_2O_3, растворенное связкой		при изгибе	при разрыве		
К5	1140–1180	8,04	1,13	С1	30,0	14,1	М3–С2	35–60
К6	1200–1230	8,21	1,06	С2	33,9	13,3	М3–СТ2	35–60
К20	1230–1280	–	–	–	–	–	С2–ЧТ	35–60
К43	900–950	9,88	1,26	С2	41,0	19,4	М3–С2	60–80
К153	850–900	16,55	2,7	С2	43,5	19,8	М3–С2	60–80

Монокорунд, имея по химическому составу сходство с электрокорундом белым, отличается от него некоторыми специфическими особенностями, которые необходимо учитывать при связывании его керамическими связками, а именно монокристальность зерен с гладкими гранями, возрастающая изометричность зерен по мере уменьшения их крупности, а следовательно, увеличение объемного веса шлифзерна (объемный вес шлифзерна № 40 — 1,71 г/см^3, № 16 — 1,94 г/см^3) и большее содержание примесей.

Все эти особенности снижают прочность сцепления зерна со связкой, и следовательно, необходимо применение связки, обладающей максимальной реакционной активностью. Из трех исследованных связок авторы предлагают связку К5 (51б) [70] (прочность образцов на разрыв составляет, МПа: на связке К8 — 15,0; 5 — 16,2; К5 (51б) — 21,2).

При изготовлении инструмента из монокорунда и при переходе от мелкого зерна к более крупному авторы также рекомендуют уплотнять структуру круга.

В отечественной практике изготавливались круги из монокорунда диаметром до 600 мм, твердостью ВМ2–М3 (зернистостью 10–12) и М1–М3 (зернистостью 40–16). Пример рецептур представлен в табл. 2.50, 2.51.

Круги диаметром до 500 мм и высотой до 25 мм обжигались в электрических печах, остальные — в туннельных верхними кругами на кругах такого же диаметра.

Таблица 2.50

Пример рецептуры абразивных кругов из монокорунда зернистостью 16–25 на связке К5 шестой структуры

Состав формовочной смеси	Твердость I		
	М	М2	М3
Шлифзерно	100	100	100
Связка	2,9	4,1	5,3
Декстрин	2,3	2,0	1,8
Жидкое стекло плотностью 1,48 г/см^3	2,6	2,9	3,1
Вода	–	0,03	0,03
Плотность сырца γ, г/см^3	2,12	2,15	2,18

Таблица 2.51

Пример рецептуры абразивных кругов из монокорунда зернистостью 10 на связке К5 восьмой структуры

Состав формовочной смеси	Твердость I			
	ВМ2	М1	М2	М3
Шлифзерно	100	100	100	100
Связка	6,0	8,0	9,6	11,8
Декстрин	3,7	3,6	3,5	3,4
Жидкое стекло плотностью 1,48 г/см^3	2,1	2,5	2,6	2,9
Плотность сырца γ, г/см^3	2,02	2,07	2,11	2,15

Все остальные операции выполнялись по действующему процессу производства инструмента на керамической связке.

Промышленное применение абразивного инструмента из легированных электрокорундов и монокорунда

Промышленное применение абразивного инструмента из легированных электрокорундов изложено в ряде работ [71–73] и методических рекомендациях [74].

Абразивный инструмент из титанистого электрокорунда для испытания изготавливался на связке К5 по унифицированной рецептуре.

В табл. 2.52 приведены результаты производственных испытаний шлифовальных кругов из титанистого электрокорунда по сравнению с инструментом, изготовленным из электрокорунда марки 25А.

Испытания показали, что по сравнению с инструментом, изготовленным из электрокорунда марки 24А, инструмент из титанистого электрокорунда обладает повышенной до 15 % стойкостью между правками и повышенным до 25 % съемом металла в единицу времени. Также установлено, что в процессе шлифования на рабочую поверхность инструмента из титанистого электрокорунда налипает металла меньше, чем на инструмент из электрокорунда марки 24А, кроме того, уменьшается шероховатость обработанной поверхности.

Повышение эксплуатационных свойств инструмента из титанистого электрокорунда авторы [66] объясняют тем, что в процессе обжига этого инструмента в зернах титанистого электрокорунда происходит распад твердого раствора титана в корунде на глубину 35–40 мкм, что сопровождается выделением в поверхностной зоне корунда тончайших закономерно ориентированных игл рутила TiO_2.

Иглы рутила развиваются за пределы зерна корунда в находящуюся с ним в контакте керамическую связку (рис. 2.21). Такое строение рабочей части зерна и связки на контакте с зерном обусловливает его разрушение в процессе работы очень мелкими частицами, вследствие чего зерна в инструменте дольше сохраняют режущую способность.

Круги из хромтитанистого электрокорунда рекомендуется применять на предварительных и окончательных операциях круглого наружного, круглого профильного, бесцентрового шлифования, плоского шлифования периферией круга и торцом, глубинного однопроходного шлифования, в том числе профильного, резьбо- и шлицешлифования при обработке следующих сталей: углеродистая качественная, легированная конструкционная, инструментальная, подшипниковая, быстрорежущая, жаропрочная и др. — как в сыром, так и в закаленном состоянии. При этом круги из хромтитанистого электрокорунда марок 91А-М и 92А-М следует применять на операциях продукционного шлифования, заточки режущего инструмента, зубошлифования и на других операциях, где идет интенсивный съем металла, деталь имеет большой припуск на обработку и круг несет значительные нагрузки, т. е. на предварительных операциях обработки, эффективность процесса шлифования возрастает с увеличением скорости до 80 м/с и более [71].

Таблица 2.52

Результаты производственных испытаний шлифовальных кругов из титанистого электрокорунда

Обрабатываемое изделие	Материал	Тип станка	Операция	Режимы шлифования				Размер и характеристика кругов	Результаты испытаний			
				Скорость круга $V_к$, м/мин	Скорость изделия $V_и$, м/мин	Поперечная подача S	Глубина резания t, мм		Стойкость круга*, %: между правками	Стойкость круга*, %: до полного износа	Шероховатость Ra, мкм: из ЭТ**	Шероховатость Ra, мкм: из 25А
Долбяки (m = 1,5; z = 50; m = 2,25; z = 30; m = 3,5 z = 28)	Быстрорежущая сталь Р18 (HRC 62–65)	Зубошлифовальный	Шлифование профиля зуба: предварительное	33–28	–	30–28 дв.ход/мин	0,04–0,07	4П 300 × 13 × 127 ЭТ25М28К5	–	128	0,63	0,63
			окончательное	33–28	–	28 дв.ход/мин	0,01–0,03	ЭТ16М38К5	–	130	0,32	0,63
Установочные плиты	Сталь 45 закаленная (HRC 42–45), сталь 12ХН3П (HRC 58–62)	Плоскошлифовальный	Шлифование плоскостей: предварительное	35	20	0,3–0,5 мм/ход	0,1–0,05	ПП 250 × 25 × 75 ЭТ40СМ26К5	200	110	0,63	1,25
			окончательное	35	20	0,3–0,5 мм/ход	0,02–0,03	ЭТ16М38К5	200	116	0,32	0,32
Магниты	Магнитный сплав ЮДНК	Плоскошлифовальный	Плоское шлифование	35	7	0,3 мм/ход	1,5	ПП250 × 25 × 75 ЭТ40СМ26К5	–	124	0,63	0,63
Турбинные лопатки	Сталь 10Х18Н9ТЛ (HRC 30–35)	Плоскошлифовальный	Плоское шлифование замка лопатки	35	7	0,6 мм/ход	0,4	ПП350 × 40 × 127 ЭТ40СТ25К5	125	–	2,5–2,5	2,5–2,5

Подрезные резцы	Быстрорежущие стали Р9 (HRC 62–65)	Плоскошлифовальный	Плоское шлифование	35	6	0,3 мм/ход	0,3	ПП350 × 40 × 127 ЭТ25СМ16К5	175	150	1,25	2,5
Пальцы демпферов	Сталь 45 цементированная (HRC 50–52)	Плоскошлифовальный	Предварительное и окончательное шлифование	35	18	2 мм/ход	0,01	ПП350 × 40 × 127 ЭТ25СМ16К5	200	–	1,25	2,5
Сверла, метчики, резцы	Быстрорежущие стали Р9 (HRC 60–62)	Заточной	Заточка по задней грани	33	Ручная подача	–	0,3–0,4	ПП400 × 40 × 127 ЭТ40С26К5	200	150	1,25	1,25
Пружины	Сталь 50ХФА "серебрянка" (HRC 43–47)	Обдирочношлифовальный	Предварительное шлифование	25–30	8	1,0 мм/ход	0,3–0,4	ПП400 × 40 × 127 ЭТ40СМ26К5	200	–	2,5	5,00
Резцы, зенкера, сверла и т.п.	Быстрорежущие стали Р9 (HRC 62–64)	Стационарное двухстороннее точило	Заточка	35	Ручная подача	–	0,4–0,5	ПП400 × 40 × 127 ЭТ40С26К5	125	115	1,25	1,25

* За 100 % приняты результаты работы кругов из корунда марки 24А.

** ЭТ – титанистый корунд.

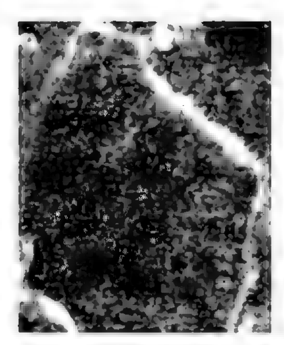


Рис. 2.21. Зерно титанистого электрокорунда в черепке абразивного инструмента на керамической связке (наблюдаются изменения (более светлая часть корунда) на контакте со связкой и развитие игл рутила (белые) от поверхности корунда в стекловидную связку; свет отраженный; николи + увеличение ×200)

Абразивный инструмент серийного производства из хромтитанистого электрокорунда марки 91А был испытан на дизельном и агрегатном заводах Камского объединения по производству большегрузных автомобилей взамен кругов из белого электрокорунда марки 25А [73]. Замене подлежали 10 наименований абразивного инструмента, применяемого на 66 шлифовальных операциях. При этом до замены абразивный инструмент из белого отечественного электрокорунда продолжительное время эксплуатировался с показателями качества на уровне оптимальных аналогов импортного инструмента.

Результаты сравнительных испытаний шлифовальных кругов на отдельных операциях приведены в табл. 2.53.

Как видно из таблицы, при шлифовании пальца реактивной штанги из стали 40Х период стойкости до полного износа кругов из хромтитанистого электрокорунда на 40 % выше, чем кругов из белого электрокорунда, при обработке деталей из сталей марок 20 и 12А — на 50 %, а при бесцентровом шлифовании болта крепления головки цилиндра из стали 40ХН2МА — почти в два раза.

При обработке коленчатого вала стойкостные показатели кругов из белого и хромтитанистого электрокорундов равны, однако качество деталей, обработанных кругами из хромтитанистого электрокорунда как по геометрическим размерам, так и по шероховатости поверхности, несомненно, выше, чем при обработке этих же деталей кругами из белого электрокорунда.

Авторами [72] исследованы режущие свойства кругов из хромтитанистого электрокорунда марки 91А на операциях плоского шлифования при обработке образцов из высокомарганцовистой стали ММЛ2 (HRC 48–52), конструкционной стали 45 (HRC 52–56), подшипниковой стали ШХ15 (HRC 56–60) и быстрорежущей стали Р6М5 (HRC 60–65).

Результаты исследований позволяют сделать выводы: шлифовальные круги из хромтитанистого электрокорунда 91А при обработке сталей 45, ШХ15 и ММЛ2 обеспечивают высокую режущую способность и наибольший коэффициент шлифования (в 1,15–1,50 раза выше, чем при работе кругами из монокорунда); круги из электрокорунда марки 91А при значительном периоде стойкости устойчиво сохраняют высокие показатели процесса шлифования на всех режимах резания; при шлифовании стали Р6М5 круги из хромтитанистого электрокорунда 91А уступают (на 10–15 %) по коэффициенту шлифования только кругам из монокорунда, и при обработке стали ШХ15 они находятся на одном уровне, а при обработке стали 45 и высокомарганцовистой стали круги из 91А в 1,3–1,4 раза превосходят круги из монокорунда.

Г.Ф. Кудасов и А.М. Карташев рекомендуют использование монокорунда для обработки следующих сталей и сплавов: быстрорежущих сталей Р18, Р9,

Таблица 2.53

Результаты сравнительных испытаний абразивного инструмента из хромтитанистого (91А) и белого (25А) электрокорундов

Оборудование, тип, модель	Обрабатываемая деталь (материал, твердость)	Шлифовальный круг	Охлаждающая жидкость	Припуск на обработку, мм (количество проходов)	Режимы резания					Эксплуатационные показатели кругов	
					Скорость круга, м/с	Частота вращения детали, об/мин	Предельная подача, мм/мин	Поперечная подача, об/мин	Глубина резания, мм	Период стойкости, лет	Шероховатость поверхности, мкм
Бесцентровое врезное, чистовое, ВШ-679Н2 (Россия)	Болт крепления головки цилиндра (сталь 40ХН2МА, HRC 38–42)	1 600 × 214 × 305 91A 25 C2 6 K11	укринол 1–3 %-ный	1,0–1,5	50	–	–	9,5	0,5–0,8	5/4000	1,25
		25A 25 C2 6 K11	"	–	–	–	–	–	0,5–0,8	2/2200	2,5
Круглое наружное врезное, черновое (Mikrosa, Германия)	Палец реактивной штанги задней подвески (сталь 40Х, НВ 255–285)	1 630 × 180 × 305 91A 25 M3 6 K11	укринол 1–3 %-ный	0,2	45	60	–	0,9	–	8/11200	2,5
		25A25 M3 6 K11	"	–	–	–	–	–	–	5/8000	2,5
Бесцентровое на проход, чистовое, 3М-184, ВШ-679Н2 (Россия)	Детали 10 наименований (сталь 35, 40Х20, 10-15КП, 20-КП)	1 500 × 150 × 305 91A 40 CT1 6 K11	укринол 1–3 %-ный	0,3–1,2 (2)	35	–	1400	3,0	0,2–0,6	80/50000	1,26
		25A40 CT1 6 K11	"	–	–	–	–	–	0,2–0,6	80/50000	2,5
Бесцентровое на проход, чистовое, ВШ-165 (Россия)	Детали 25 наименований (сталь 20, 12А)	1 350 × 100 × 203 91A 25 CT1 6 K11	укринол 2 %-ный	0,25–0,32	35	–	1450	–	0,12–0,16	600/13500	0,63
		25A25 CT1 6 K11	"	–	–	–	–	–	0,12–0,16	400/9000	1,0
Круглое наружное врезное, чистовое (Landis, США)	Коленчатый вал, 3-й ремонтный размер коренных шеек (сталь 42ХМФА, HRC 52-62)	1 900 × 38,6 × 305 91A 25 C1 7 K5	укринол 1–2 %-ный	0,5	35	60	–	Ручная	0,25	1/600	0,40
		25A 25 C1 7 K5	"	–	–	–	–	–	–	1/600	0,63

Р9К10, Р9К5, Р9К5Ф5, Р14Ф4, Р18Ф2, Р18К5Ф2; жаропрочных сплавов ЭИ327, ЭИ4376, ЭИ445Р, ЭИК, ЭИ617, ЭИ826, ЭИ929; литых твердых сплавов типа стеллитов В-3К, № 1 и 2; хромистых сталей ХВГ, ХГ и ШХ15. Стали и сплавы, близкие по своим свойствам сплавам указанных марок, также успешно обрабатываются инструментом из монокорунда на самых различных операциях шлифования: круглом наружном, внутреннем, профильном, плоском, бесцентровом, ленточном, на заточке и др.

Например, по сравнению с кругами из белого электрокорунда (1400 × 40 × × 127 25 А 40–25 СМ2 К5) круги из монокорунда той же характеристики на операции круглого шлифования в центрах различных деталей из 18ХНВА и 38ХСА обеспечивают повышение производительности до 70 %; на операции круглого наружного шлифования различных режущих инструментов из Р18 (HRC 62–64) производительность повышается на 50 %; при заточке фрез и разверток из Р9 и ЭИ184 (HRC 60–62) круги из монокорунда работают без правки и прижогов и т. д.

Разработка керамических связок и способов упрочнения кругов повышенной твердости и прочности

Для абразивной обработки в ряде случаев требуются шлифовальные круги на керамической связке повышенных твердости и прочности. Изготовление таких кругов по обычной технологии затруднено или невозможно вследствие того, что в кругах из электрокорунда твердостью СТ3 и выше увеличение содержания связки (для повышения твердости) приводит к ее вытеканию и деформации круга, а в кругах из карбида кремния — к браку "черное пятно" (продукта разложения SiC). Поэтому структуру круга уплотняют, не увеличивая содержания в нем связки, а корректируя ее состав, либо повышают огнеупорность связки за счет изменения ее шихтового состава, либо разрабатывают новые связки.

В табл. 2.54–2.55 представлены составы керамических связок для изготовления твердых и прочных кругов и физико-механические свойства образцов, изготовленных на этих связках.

В составах № 1 (К20) и № 2 (К15) по сравнению со связкой К5 уменьшено содержание боросиликатной фритты, увеличена огнеупорность связки с 1140–1160 до 1230–1300 °С, что обеспечило уменьшение деформации образцов, в то же время прочность обожженных образцов позволяет изготовлять круги с рабочей скоростью 50–60 м/с.

Авторами [75] разработана связка К50 с борокальциевой фриттой определенного химического состава, введение которой повышает реакционную активность связки к зерну электрокорунда, механическую прочность изделия на уровне высокореакционной связки К43 и в то же время обеспечивает сохранение структуры абразивного черепка при обжиге, т. е. деформации изделия не происходит. Связка имеет следующий химический состав, вес. %: SiO_2 38,0–22,0, Al_2O_3 14,5–15,5, B_2O_3 25,0–35,0, CaO 12,5–17,5, Na_2O 6,5–7,5, K_2O 2,5–3,5 при соотношении $B_2O_3/CaO \approx 2$.

Авторами [76] разработан состав связки с применением волластонитового концентрата № 4 (К12). При нагревании шихта с волластонитом расплавляется лишь частично, нерасплавившиеся остатки волластонитовых иголок создают

Таблица 2.54

Шихтовой состав и свойства керамических связок

Номер состава	Марка связки	Шихтовой состав связки, вес. %	Огнеупорность, °С	Показатель преломления связки	Микротвердость связки, МПа	Удельная поверхность, $см^2/г$	Растекаемость, %	Относительное количество Al_2O_3, растворенное связкой, %	Температура начала размягчения, °С
1	К20	Полевой шпат – 43–40 Каолин (огнеупорная глина) – 30–35 Боросиликатная фритта – 20 Тальк – 5	1230–1260	1,492–1,498	680	4500–6500	120–140	10,10	700
2	К15	Полевой шпат – 35–32 Каолин (огнеупорная глина) – 45–48 Боросиликатная фритта – 15 Тальк – 5	1250–1300	1,493	670	4500–6500	100–120	9,50	780
	К5	Полевой шпат – 30 Каолин (огнеупорная глина) – 30 Боросиликатная фритта – 30 Тальк – 10	1140–1160	1,490	726	4500–6500	200	10,30	670
3	К50	Полевой шпат – 30–40 Каолин (огнеупорная глина) – 30 Борокальциевая фритта – 30–34 Тальк – 0–6	1060–1120	1,480	890	4500–6500	260	14,20	690
	К43	Полевой шпат – 40–30 Каолин (огнеупорная глина) – 20 Борлитиевая фритта – 30–40 Криолит – 10	900–950	1,493	910	4500–6500	250	16,50	520
4	К12	Полевой шпат – 45–43 Каолин (огнеупорная глина) – 30 Боросиликатная фритта – 13–18 Воластонитовый концентрат – 12–10	1180–1250	1,480	840	4500–6500	140–150	12,25	840–990

Таблица 2.55

Физико-механические свойства абразивных образцов шестой структуры

Марка связки	Характеристика абразивного образца	Предельная прочность на изгиб, МПа	Усадка, %	Наличие деформации	Скорость V, м/с	
					$V_{разр}$	$V_{раб}$ расчетная с коэффициентом запаса 1,7
K20	25A 40 C1	33	1	Деформация отсутствует	–	–
	25A 40 CT2	35	1		110–130	60–70
	25A 40 T2	39	2		–	–
	91A 40 C1	–	–	То же	110–120	60–70
	91A 40 CT2	34	1	»	–	–
	91A 40 T2	38	2	»	–	–
K15	25A 40 C1	30	1	»	–	–
	25A 40 CT2	35	1	»	95–110	60
	25A 40 T2	38	2	»	–	–
	91A 40 C1	28	1	»	–	–
	91A 40 CT2	34	2	»	95–110	60
	91A 40 T2	36	2	»	–	–
K5	25A 40 C1	35	2	Деформация незначительная	–	–
	25A 40 CT2	41	4		95	55
	25A 40 T2	43	4		104–120	60–70
	91A 40 C1	38	2	То же	–	–
	91A 40 CT2	35	4	»	95	55
	91A 40 T2	36	4	»	104–120	60–70
K50	25A 40 C1	38	Усадка и деформация отсутствуют		–	–
	25A 40 CT2	40			140–145	80
	25A 40 T2	42			–	–
	91A 40 C1	36	То же		–	–
	91A 40 CT2	42	»		140–145	80
	91A 40 T2	47	»		–	–
K43	25A 40 C1	38	3	Деформация значительная	120–140	60–80
	25A 40 CT2	42	6		–	–
	25A 40 T2	45	6		–	–
	91A 40 C1	35	Деформация значительная		–	–
	91A 40 CT2	42			120–140	60–80
	91A 40 T2	42			–	–
K12	25A 40 C1	36	Усадка и деформация отсутствуют		–	–
	25A 40 CT2	38			130–135	70
	25A 40 T2	40			–	–
	91A 40 C1	36	То же		–	–
	91A 40 CT2	38	»		–	–
	91A 40 T2	42	»		–	–

плотный каркас, препятствующий изменению прежнего объема, за счет структуры волластонита уменьшается усадка изделия. При охлаждении изделий происходит дальнейшая кристаллизация и скрепление между собой иголок волластонита. При этом связка реакционноспособная, и при взаимодействии ее с абразивным зерном обеспечивается достаточная механическая прочность. Следует учесть, что количество связки, декстрина и жидкого стекла в кругах на связке К12 содержится меньше на 20–25 %, чем в кругах, например, на связке К5 или К20. Связка К12 обеспечивает выпуск инструмента степенью твердости Т1 и выше без изменения линейных размеров и деформации.

Эксплуатационные показатели абразивного инструмента на связках К20, К15, К50, К12 находятся на уровне либо инструмента, изготовленного на связках К5, К43, либо выше на 20–30 %.

Авторами [77, 78] повышение прочности и твердости абразивного черепка достигалось введением в формовочную смесь абразивных зерен более мелкой фракции, позволяющей увеличить число контактов зерен со связкой (рис. 2.22).

Рис. 2.22. Схема построения упрочненного черепка:

а, б, в — зерна шлифматериала основной зернистости; *г, д, е* — зерна шлифматериала заполнителя; *1, 3, 5* — основные мостики связки; *2, 4* — дополнительные мостики связки

В табл. 2.56 приведены зернистости шлифматериала и заполнителя пустот в круге, позволяющие получить наиболее плотную упаковку при смешивании с основным шлифматериалом данной зернистости.

Из данных табл. 2.57 следует, что по мере уменьшения размеров зерен основного материала максимальное содержание зерен заполнителя должно,

Таблица 2.56

Соотношение зернистостей основного материала и заполнителя

Зернистость основного шлифматериала	Зернистость шлифматериала заполнителя	Соотношение размеров зерен основной фракции и заполнителя, мкм
200	40	2250/450
160	32	1800/357,5
125	25	1425/282,5
100	20	1125/225
80	16	900/180
63	12	715/142,5
50	10	565/112,5
40	8	450/90
32	6	357,5/71,5
25	5	282,5/56,5
20	4	225/45
16	М40	180/34
12	М28	135/24
10	М28	110/24
8	М20	90/17

Таблица 2.57

Состав абразивных смесей

Состав смеси зерен	Количество заполнителя, % основного материала	Насыпная масса смеси, г/см^3	Удельная поверхность смеси, см^2/г	Количество незаполненных пустот в единице объема, %
24А40 + 24А8	27	2,0805	99	38,44
24А25 + 24А5	35	2,0866	179	37,57
24А16 + 24АМ40	40	2,0051	415	37,89
24А10 + 24АМ20	30	1,7970	654	44,99
24А8 + 24АМ20	30	–	–	–

с одной стороны, увеличиваться вследствие роста объема пустот, а с другой — уменьшаться из-за повышения сил внутреннего трения в массе смеси.

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов, изготовленных с использованием одной и двух зернистостей, представлены в табл. 2.58, из которой следует, что введение в смесь дополнительно шлифматериала более мелкой зернистости приводит при одинаковом количестве связки к увеличению твердости на одну-две степени и прочности на изгиб от 5 до 60 % при содержании связки 17 и 22 мас. ч. на 100 мас. ч. зерна.

Таблица 2.58

Физико-механические свойства образцов из белого электрокорунда

Характеристика образцов				Показатели испытания физико-механических свойств	
Шлифматериал	Структура	Связка	Количество связки на 100 мас. ч. зерна, мас. ч.	Твердость по ГОСТ 18118-79	Сопротивление изгибу, МПа
25А 40	6	К5	12	С1	40,9
	6	К5	17	СТ2	42,8
	6	К5	22	Т2	43,9
25А 40 + 25А 8	6	К5	12	С2	40,2
	6	К5	17	Т1	42,8
	6	К5	22	ЧТ	44,7
25А 25	7	К5	12	С1	41,5
	7	К5	17	СТ2	42,8
	7	К5	22	Т1	44,7
25А 25 + 25А 5	7	К5	12	С2	47,2
	7	К5	17	Т1	48,3
	7	К5	22	Т2	50,2
25А 16	7	К5	12	С1	41,0
	7	К5	17	СТ1	46,0
	7	К5	22	СТ2	49,6
25А 16 + 25 А М40	7	К5	12	С2	39,9
	7	К5	17	Т1	55,7
	7	К5	22	Т2	64,0

Применение шлифматериалов двух зернистостей способствует изменению структуры черепка (рис. 2.23), что позволяет повысить стойкость абразивных кругов до полного износа на 30–33 % по сравнению с аналогичным показателем кругов из шлифматериала одной зернистости при сохранении качества обрабатываемой поверхности (табл. 2.59).



Рис. 2.23. Микроструктура черепка, изготовленного из белого электрокорунда зернистостью 40 (каркас) и 8 (заполнитель):

1 — зернистость 40; *2* — зернистость 8; *3* — поры; *4* — керамическая связка (увеличение ×150)

Таблица 2.59

Результаты испытаний шлифовальных свойств опытных кругов

Операция шлифования	Характеристика инструмента	Съем металла, кг	Режущая способность, г/с	Производительность, дет./ч	Стойкость, шт./дет.	Шероховатость, мкм
Бесцентровое врезное профильное шлифование иглы распылителя со скоростью 60 м/с	Опытные круги 14А 16/М40 ЧТ 5 К5 1 400 × 10 × 127 1 400 × 28 × 127	2,95 2,95	1,09 1,09	1330 1330	60/11700 60/11700	0,60–0,80 0,60–0,80
	Круги МК 58075 фирмы Atlantik (ФРГ): 1 405 × 10 × 127 1 423 × 28 × 127	2,11 2,11	0,583 0,583	1000 1000	52/9000 52/9000	0,60–0,80 0,60–0,80
Предварительное бесцентровое шлифование роликов со скоростью 49 м/с	Опытный круг 1 500 × 20 × 305 24А 40/8 СТ2 5 К5	0,3	–	–	–/8000	1,20–0,50
	Круги серийного производства 1 500 × 20 × 305 24А 40 СТ3 5 К5	0,3	–	–	–/1600	1,60–1,00

Примечание. В числителе приведена стойкость инструмента между правками, в знаменателе — до полного износа.

Таким образом, использование шлифматериалов двух зернистостей (для каркаса и заполнителя) позволяет повысить твердость, прочность и эксплуатационные показатели кругов без увеличения количества связки. Эта возможность определяет новые направления совершенствования технологии производства скоростных кругов с упрочненной центральной частью.

2.2.2. Керамические связки для карбида кремния

В настоящее время объем выпуска инструмента из карбида кремния на керамических связках составляет до 20 % от общего объема выпуска инструмента на этих связках.

Механическая прочность обожженного инструмента из карбида кремния на 30–50 % ниже прочности инструмента из электрокорунда, хотя при изготовлении инструмента из SiC связки расходуется в два-три раза больше, чем при изготовлении инструмента из электрокорундовых материалов. В связи с этим абразивный инструмент из SiC применяется для работы с рабочей скоростью 35 м/с.

Низкая механическая прочность инструмента из карбида кремния объясняется невысокой прочностью сцепления зерен карбида кремния керамическими связками, что связано как с низкой адгезионной способностью и механической прочностью самих керамических связок, так и с особенностью поведения самого карбида кремния, который при повышении температуры до 900 °С и выше окисляется с образованием на зерне SiC тонкой поверхностной пленки SiO_2 и с выделением газа CO_2 [79].

Исследованиями, проведенными В.Н. Любомудровым, Э.И. Канс, Э.З. Тележкиной, Н.Д. Корчагиной и др., установлено, что карбид кремния под влиянием расплавленной керамической связки в условиях окислительного обжига абразивного инструмента начинает разлагаться с образованием элементарного кремния и углерода уже при температуре 700–800 °С.

Механизм этого процесса можно представить следующим образом: углерод при недостатке кислорода образует темную пленку между зерном и связкой (зауглероженность инструмента), а при увеличении содержания кислорода оба эти компонента окисляются: кремний — до SiO_2, частично покрывающий зерно и частично растворяющийся в связке, а углерод — до CO и CO_2, которые задерживаются в связке и образуют в ней пузыри, а на изделиях — вспученность [7].

Таким образом, была установлена решающая роль окислительной среды и жидкой фазы щелочных связок (причем натриевой в большей степени, чем калиевой) на появление в абразивном инструменте на керамической связке брака в виде "черных пятен" и "вспучивания".

Проведенные исследования послужили основой для разработки связки К3 огнеупорностью 1410–1430 °С, состоящей из полевого шпата (70–80 %) и огнеупорной глины (20–30 %).

Анализ последующих работ указанных авторов позволяет сделать следующие выводы.

При производстве инструмента из карбида кремния на керамических связках во всех случаях будут идти процессы с разложением SiC. Необходимо говорить о степени разложения, о конечных продуктах разложения, о различном влиянии веществ на разложение карбида кремния. Степень разложения будет зависеть от количества жидкой фазы, от ее свойств и от температуры обжига инструмента.

С увеличением в составе связки типа К3 SiO_2 и Al_2O_3 склонность к образованию "черного пятна" уменьшается, так как вязкость связок при этом увеличивается.

Температура появления "черного пятна" зависит от крупности абразивного зерна SiC: чем больше номер зерна, тем выше температура появления "черного пятна" (40 → 25 → 16 → 10 → 8 → 6 и т. д.), т. е. в крупнозернистых изделиях, как более пористых, выгорание продуктов разложения происходит значительно легче и быстрее, чем реакция взаимодействия связки с мелкими частицами, которые дают большее количество продуктов разложения.

Разложения SiC можно избежать при проведении обжига абразивных SiC-изделий в нейтральной среде (например, в среде азота), что в промышленных условиях малореально.

Процесс обжига инструмента необходимо вести в окислительной атмосфере, для окисления продуктов разложения SiC необходим хороший газообмен.

Исследование влияния модификаторов Fe_2O_3, CaO, MgO, $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2O, K_2O и B_2O_3 на механическую прочность образцов, изготовленных из SiC, приведенное в работе [80], показало, что наиболее заметный рост прочности обнаружен на образцах, изготовленных из зерна SiC на связке, модифицированной флюсами состава CaO, MgO, $CaCO_3$, $MgCO_3$ и B_2O_3. Так, например, добавка в связку $CaCO_3$ в количестве 9 % повышает прочность образцов на 70 %, добавка 15 % MgO — на 65 %, а добавка 10 % B_2O_3 — на 114 %. При использовании модификаторов, повышающих механическую прочность абразивных изделий на границе зерно SiC — связка, не было обнаружено продуктов разложения SiC, а между зернами SiC сформировались "правильные" связующие мостики связки с повышенной механической прочностью за счет снижения поверхностного натяжения жидкой фазы связки, вызванной введением в нее B_2O_3, усиливающей адгезию связки к зерну.

В работе [81] исследовалось применение в качестве связки для карбида кремния стекла следующего состава, %: SiO_2 68,5, Al_2O_3 3,13, Fe_2O_3 0,23, CaO 8,36, MgO 0,81, K_2O 6,10, Na_2O 9,63, B_2O_3 2,45. Стекло применялось в чистом виде в смеси с 20 % силиката натрия и с 15, 25, 35, 50 % бентонита для повышения механической прочности сырца. При оптимизации состава формовочной смеси и температуры обжига (900 °С, 1 ч выдержки) было получено на образцах увеличение прочности и твердости черепка из SiC в два раза выше ($\sigma_{раз}$ = 10–11 МПа) по сравнению с инструментом на связке К3.

Авторы [82] предложили связку, реагирующую с зерном SiC, состоящую из стекла, содержащего Fe_2O_3 (70–80 % SiO_2, 6–9 % Al_2O_3, 6–8,5 % K_2O и 3,5–7 % Fe_2O_3), и детскосельской глины, содержащей до 8 % Fe_2O_3, которая при обжиге абразивного инструмента в восстановительной среде обеспечивает образование ортосиликата $2FeO{\cdot}SiO_2$ (фаялита) в пограничной зоне зерно—связка без разложения SiC, что способствует увеличению прочности инструмента.

В работе [83] в связку К3 добавляли в качестве "модификаторов" сульфат марганца (связка K3S) и карбонат марганца (связка К3С) в количествах до 2 % (по массе), что способствовало повышению прочности (до 50 %) и твердости (на две-три ступени) абразивных кругов, изготовленных на "модифицированных" связках и обожженных при температуре 1200–1260 °С (табл. 2.60).

Авторами [84] для повышения прочностных свойств инструмента из SiC предлагается в связку, содержащую 48–52 % SiO_2, 18–25 % Al_2O_3, 1,8–4,0 % CaO, 0,1–1,0 % MgO, 6,0–7,0 % K_2O + Na_2O, дополнительно ввести P_2O_5 и Cr_2O_3 в количествах 15–18 и 1,0–2,0 % соответственно. Введение оксида P_2O_5

Таблица 2.60

Физико-механические свойства образцов

Связка	Температура обжига, °С					
	1200		1230		1260	
	$\sigma_{разр}$, МПа	Твердость по ГОСТу	$\sigma_{разр}$, МПа	Твердость по ГОСТу	$\sigma_{разр}$, МПа	Твердость по ГОСТу
3К	5,0	ВМ1	5,0	ВМ2	7,1	М3
3KS	7,4	М2	8,7	СМ1	9,6	СМ2
3КС	7,9	СМ1	8,9	СМ1	9,7	СМ2

способствует образованию метафосфата алюминия $AlPO_3$, вызывая улучшение смачивания абразивного материала связкой, оксид хрома, взаимодействуя с P_2O_5 с образованием фосфата хрома, вызывает субмикроскопическую кристаллизацию, что способствует увеличению физико-механических свойств инструмента. Так, пределы прочности сырца и обожженного образца из SiC на указанной связке возрастают по сравнению со связкой К3 в два раза и равны 0,03—0,06 МПа (твердость М1—С2) и 18—38 МПа (твердость М1—С2) соответственно.

В целях повышения механической прочности за счет создания приконтактного минералообразования и как следствие повышения физико-механических и эксплуатационных свойств инструмента авторы [85] вводят в состав связки MgO до 18 %. В этом случае связка имеет следующий химический состав, %: SiO_2 55—69,0, Al_2O_3 12—20,0, MgO 6—18,0, Na_2O + K_2O 3,5—8,0, B_2O_3 0,5—2,5, BaO 0,5—2,5.

В целях предотвращения разложения карбида кремния в состав фритты авторы [86] ввели оксид Cr_2O_3 или Ni_2O_3 в пределах от 0,5 до 5 % по весу, а остальные компоненты фритты взяты в следующем соотношении, вес. %: SiO_2 60—70, Al_2O_3 3,5—5,0, B_2O_3 17,0—20,0, Na_2O 1,0—1,5, K_2O 4,5—5,0, Li_2O 1,0—1,5; при этом керамическая связка состоит из полевого шпата или перлита (40—70 %), огнеупорной глины (10—20 %), фритты (10—40 %).

Авторами [87] вместо широко применяющихся в связках для SiC огнеупорных глин (латненской, положской, новорайской) предложено использовать углистую глину или смесь огнеупорной глины и углисто-гумусовых веществ (торфообразной массы по ГОСТ 9172—71), которые обеспечивают высокую прочность свежезаформованным, высушенным и обожженным изделиям из SiC. К основным достоинствам этого вида сырья также относится создание в инструменте дополнительной пористости структуры за счет выгорания С (до 3 %) и органических примесей (п.п.п. 28—30 %), при этом уменьшается зауглероженность изделий. Керамическая связка имеет следующий состав, мас. %: SiO_2 60—66, Al_2O_3 18—20, TiO_2 0,7—1,6, Fe_2O_3 0,4—1,0, CaO 4,3—0,5, MgO 0,4—1,0, K_2O 5—12,0, Na_2O 0,2—0,4. Механическая прочность сырца на этой связке из карбида кремния зернистостью 25 равна: сырого образца — 0,051 МПа, высушенного — 1,26 МПа, прочность на разрыв — 10,81 МПа, на изгиб — 25 МПа. Эксплуатационные свойства инструмента по сравнению с инструментом на связке К3 повышаются на 30—40 %.

В работах [88, 89] была исследована контактная зона SiC — керамическая связка методом локального микрорентгеноспектрального анализа на приборе

МАР-2 и обнаружено незначительное взаимодействие SiC с компонентами связки с образованием соединения, близкого по составу к муллиту, что позволило авторам сделать предположение о химической активности полевого шпата к карбиду кремния.

При термообработке SiC в контакте со связкой К3 на его поверхности обнаружены области, нарушающие целостность границы SiC со связкой, которые вызывают уменьшение прочности удержания зерна в композиции SiC—связка. Подобные явления особенно ярко выражены, если в состав парной композиции входит полевой шпат. Менее выражены подобные процессы, если полевой шпат входит в состав шихты, и процессы почти полностью погашаются, если шихту предварительно профриттовать.

На границе раздела зерно—связка, вблизи нее, как правило, обнаружены элементы, входящие в состав легкоплавких компонентов, что свидетельствует о том, что в непосредственный контакт с карбидом кремния вступает наиболее легкоплавкий компонент связки. Авторы делают предположение, что модифицирующие добавки могут влиять на взаимодействие, если они входят в состав легкоплавких компонентов, в противном случае они оказывают влияние на физико-механические свойства связок (количество стеклофазы, однородность, прочность, пористость, микротвердость и т. д.).

Таким образом, проведенный анализ зарубежных и патентных материалов позволяет сделать следующие выводы:

проводятся многочисленные исследования в области связывания карбида кремния керамическими связками, в том числе изучается "предел" разложения SiC связкой, выше которого возникает опасность вспучивания связки и ухудшения механических свойств изделий, а также поиск наиболее активных связующих, к которым авторы относят борсодержащие флюсы [90];

исследования проводятся с применением современных методов анализа: электронной микроскопии, микрозондового рентгеноспектрального анализа (на приборах Cameca, "Хитачи" и др.);

для улучшения смачивания зерен карбида кремния со связкой предлагается метод покрытия зерен тонкими порошками SiC, Si_3N_4, стеклами различного состава и др. [91], в результате чего на поверхности зерна SiC образуются пленки, которые, взаимодействуя со связкой, тем самым способствуют увеличению прочности инструмента;

предлагаются стекловидные, фриттованные и легкоплавкие связки различного химического состава [92];

зарубежные фирмы для изготовления керамических связок для инструмента из карбида кремния применяют различное сырье: огнеупорные глины, полевые шпаты, волластонит, борные и борлитиевые стекла, кремнезем, литийсодержащие материалы (петалит, манганат лития, молибден и др.) [93]; это позволяет сделать вывод, что фирмы изготавливают связку как с высокой огнеупорностью (более 1200 °С), так и с низкой огнеупорностью (менее 1100 °С).

Из обзора литературы также ясно, что прочность сцепления между зерном карбида кремния и связкой — это важный фактор, от которого зависит механическая прочность абразивного инструмента.

Однако, несмотря на большой объем проделанных работ по изысканию наиболее рациональных связок для абразивного инструмента из SiC, отече-

ственная промышленность до 1972 года продолжала использовать связку К3 и ее модификации. Это объясняется отчасти недостаточно убедительными результатами ряда проведенных к тому времени работ, отчасти отсутствием преимуществ в той или иной связке, выявленных при проведении промышленных испытаний; необходимостью применения такого нового вида сырья, как волластонит, разработка которого в СССР еще не была освоена; трудностью внедрения предложенных связок в производство, поскольку это влекло за собой изготовление на тех же площадях новой связки; необходимостью изменения режимов термообработки изделий или созданием специальных печных агрегатов.

Из обзора литературных данных и опыта работы абразивных заводов в качестве основных требований к керамическим связкам, используемым в производстве абразивного инструмента из карбида кремния, можно выделить следующие:

керамическая связка должна хорошо смачивать поверхность зерен SiC, поскольку механические свойства инструмента на керамической связке зависят именно от степени смачивания и поверхностного натяжения жидкой фазы, образующейся в связке во время обжига инструмента;

в керамическую связку необходимо вводить легкоплавкие компоненты, стекла (фритты), снижающие температуру образования жидкой фазы и обеспечивающие реакционную активность связки. При этом стекла (фритты) должны быть механически прочными. Это можно достичь за счет введения в связку оксидов, увеличивающих диффузионное взаимодействие SiC со связкой (B_2O_3, Li_2O, BaO, CaO и др.), а также за счет использования связки на основе алюмохромофосфатов;

вводимые в связку компоненты должны обеспечивать увеличение механической прочности абразивного черепка за счет их приконтактной кристаллизации с SiC без его разложения (отсутствие "зачернения").

Взаимодействие карбида кремния с керамической связкой К3

Взаимодействие керамической связки К3 с карбидом кремния изучалось с помощью термографического и кристаллооптических методов анализа при температурах 200, 600, 1000 и 1250 °С [94]. Латненская огнеупорная глина, являющаяся компонентом связки К3, состоит из чешуйчатых поляризующих агрегатов каолинита (n = 1,545±0,005) и обломочных зерен кварца. На термограмме (рис. 2.24) наблюдается слабовыраженный эндоэффект в интервале 100–200 °С, связанный с удалением адсорбционной воды, а в интервале 420–600 °С — эндотермический эффект, вызванный разрушением кристаллической решетки каолинита и его деформацией; при температуре выше 900 °С наблюдается эндотермический эффект, обусловленный образованием муллита.

После обжига при 600 °С изменения каолинита, наблюдаемого под микроскопом, не обнаруживаются, за исключением незначительного понижения показателей преломления глинистых агрегатов (до 1,535±0,005) в связи с началом разложения каолинита. При температуре 1000 °С вследствие разрушения каолинитовой решетки и аморфизации материала глинистые агрегаты становятся малопрозрачными и изотропными. Повышение показателя преломления

до 1,550±0,1, вероятно, вызвано началом образования муллита, хотя отдельных кристаллов муллита не обнаружено.

При 1250 °С обожженные агрегаты глины не изменяются, остаются изотропными и малопрозрачными, значительно повышается показатель преломления агрегатов (до 1,570±0,005), что является следствием усиления процесса муллитизации. Кристаллизация муллита субмикроскопическая, отдельных кристаллов не обнаружено. Наблюдаются включения стекла с низким показателем преломления.

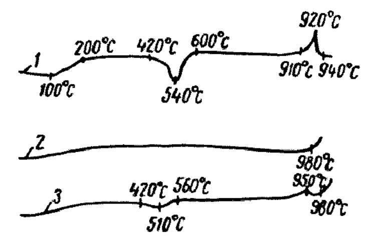


Рис. 2.24. Термограммы компонентов и смесей:

1 – латненская глина; *2* — белогорский полевой шпат; *3* – связка К3 (латненская глина — белогорский полевой шпат)

Белогорский полевой шпат, являющийся вторым компонентом связки К3, представлен микроклином. Отдельные зерна микроклина затронуты выветриванием. После обжига при 600–1000 °С изменений в полевом шпате не обнаружено, что подтверждается и термограммой (см. рис. 2.24, кривая *2*): дифференциальная кривая представляет собой прямую линию. В полевом шпате, обожженном при 1250 °С, плавление и превращение его в стекло (n = 1,484±0,005) происходит почти полностью. Сохраняются только единичные зерна еще не остекловавшегося полевого шпата.

Керамическая связка К3, обожженная при 600 °С, содержит зерна микроклина, кварца и глинистые агрегаты, в которых наблюдается начало разложения: каолинит утрачивает чешуйчатую структуру, слабо поляризует; показатель преломления снижается до 1,535±0,005. При 1100 °С преобладающая часть глинистых агрегатов в результате разложения становится бурой, непрозрачной, изотропной. В отдельных агрегатах наблюдается начало муллитизации, что проявляется в образовании мелких (до 3 мкм) зерен и маленьких (2 × 4 мкм) призм муллита, отличающихся высоким показателем преломления и слабой поляризацией. В зависимости от различной степени муллитизации показатель преломления агрегатов изменяется в пределах 1,540–1,560, отдельные сильно муллитизированные агрегаты имеют n > 1,560.

Преобладающая часть зерен полевого шпата затронута разложением, покрыта трещинами, но хорошо поляризует. С началом разложения и остекловывания показатель преломления микроклина снижается до 1,485±0,005. По-видимому, в процессе обжига происходит растворение глины в полевошпатовом стекле. Субмикроскопические включения могут быть отнесены к муллиту. В небольшом количестве сохраняются кусочки обожженной глины и малоизмененные зерна микроклина. На термограмме (см. рис. 2.24, кривая *3*) наблюдается эндоэффект, обусловленный разложением каолинита, и экзоэффект, связанный с началом муллитизации.

Резкий подъем дифференциальной кривой при 1000 °С указывает на начало плавления полевого шпата в присутствии глины.

В композиции шлифзерно 63С25 — связка К3 (70 % полевого шпата и 30 % глины) при 600 °С взаимодействия между компонентами не обнаружено. При

1000 °C на поверхности зерен полевого шпата заметно начало разрушения: глина образует бурые субмикроскопические агрегаты, зерна карбида кремния не изменяются, в аншлифе видно, что зерна карбида кремния окружены неоднородной темно-серой связующей массой, состоящей из зерен полевого шпата, смешанных с глинистой составляющей.

При 1250 °C связка остекловывается и располагается вокруг зерна карбида кремния, что хорошо видно в аншлифе. Связка в аншлифе выглядит как серая масса. На поверхности шлифзерен SiC заметно начало разрушения за счет воздействия газовой среды. Установлено, что стекло содержит точечные кристаллические включения, показатель преломления стекла 1,495±0,005; сохраняются единичные зерна полевого шпата. Взаимодействия между связкой К3 и карбидом кремния не происходит, так как образовавшаяся стеклофаза имеет тот же показатель преломления, что и связка К3.

Взаимодействие карбида кремния с расплавленными алюмосиликатными стеклами

Изучение взаимодействия зерна карбида кремния проводилось с использованием алюмосиликатных стекол, состав которых представлен в табл. 2.61, с привлечением современных методов локального анализа [95].

Определение смачивания и работы адгезии проведено по методике [244]. Значения краевых углов смачивания и работы адгезии исследованных стекол представлены в табл. 2.62.

Как видно из табл. 2.61 и 2.62, состав стекол (независимо от температуры) существенно влияет на смачивание поверхности карбида кремния. Так,

Таблица 2.61

Химический состав стекол, %

№ п/п	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	K_2O	Na_2O	Li_2O	Примеси
1	78,56	3,57	10,98	4,13	2,50	–	0,36
2	68,52	3,70	20,47	4,06	2,02	–	0,63
3	59,54	3,20	29,13	3,88	2,54	–	1,71
4	49,50	3,52	38,20	3,80	2,40	–	2,58
5	58,50	7,20	26,80	3,88	2,40	–	1,22
6	68,50	3,40	19,50	5,78	2,40	–	0,42
7	66,70	3,48	19,50	7,70	2,40	–	0,52
8	62,80	3,60	19,60	11,10	2,34	–	0,56
9	67,80	3,80	19,52	3,88	4,42	–	0,58
10	64,39	3,57	19,40	3,80	8,22	–	0,62
11	62,04	3,75	19,80	3,80	10,20	–	0,41
12	68,70	3,60	19,42	3,88	2,45	1,20	0,73
13	65,94	3,91	19,62	4,06	2,60	3,41	0,46
14	64,48	3,71	19,84	3,80	2,40	4,86	0,91
15	63,50	7,20	19,40	3,50	2,00	3,88	0,52
16	62,50	9,10	19,20	2,90	2,00	3,80	0,50

Таблица 2.62

Значения краевых углов смачивания и работы адгезии

№ п/п	Краевые углы смачивания, град				Работа адгезии W_a, эрг/см^2		
	900 °С	1000 °С	1150 °С	1300 °С	1000 °С	1150 °С	1300 °С
1	–	114	–	99	215	143	323
2	122	108	–	58	221	290	358
3	118	60	–	34	300	–	323
4	80	32	–	13	298	–	297
5	–	120	71	60	–	–	–
6	122	108	–	58	224	290	358
7	120	102	96	56	280	302	380
8	117	83	55	38	360	440	480
9	90	50	32	26	490	512	560
10	120	101	99	56	284	300	445
11	117	82	68	42	310	420	470
12	113	52	34	30	440	460	500
13	88	82	78	30	402	507	620
14	80	43	30	22	490	562	600
15	32	20	12	10	470	532	588
16	34	22	13	9	–	–	–

изменение содержания в составе стекла B_2O_3 от 10 до 38,2 % приводит к значительному уменьшению угла смачивания в пределах 114–13° (стекла № 1–4); соответственно, работа адгезии этих стекол возрастает от 215 до 323 эрг/см^2. Увеличение содержания в стекле № 4 B_2O_3 до 38,2 % незначительно понижает работу адгезии, что, по-видимому, связано с незначительным уменьшением угла смачивания и с небольшим увеличением поверхностного натяжения. Увеличение содержания Al_2O_3 в стекле № 5 по сравнению, например, со стеклом № 2 ухудшает смачивание ($\theta_{1300\,°C}$ = 60°). С повышением температуры от 900 до 1300 °С краевой угол смачивания стекол № 1–5 уменьшается от 122 до 60°.

Для изучения влияния щелочных оксидов на смачивание карбида кремния были выбраны стекла, содержащие 20 % B_2O_3. При увеличении в таких связках содержания K_2O от 4 до 11 % (стекла № 2, 6–8) краевой угол смачивания изменяется от 108 до 26 град, а работа адгезии возрастает от 244 до 560 эрг/см^2. Увеличение содержания в стекле Na_2O от 2,62 до 10,2 % (стекла № 2, 9–11) снижает угол смачивания от 108 до 30°; при этом работа адгезии возрастает от 224 до 500 эрг/см^2. Таким образом, стекла с повышенным содержанием K_2O более адгезионно-активны по отношению к карбиду кремния, чем стекла с повышенным содержанием Na_2O. Введение в состав стекла оксида Li_2O в количестве от 1 до 5 % (стекла № 12–14) сопровождается уменьшением краевого угла смачивания от 88 до 10 град и увеличением работы адгезии от 402 до 600 эрг/см^2.

Увеличение содержания Al_2O_3 в стеклах № 15, 16 по сравнению, например, со стеклом № 14 практически не влияет на смачивающую способность этих стекол.

Таким образом, проведенные исследования показали, что смачиваемость карбида кремния алюмосиликатными стеклами возрастает по мере введения

в них оксидов щелочных металлов в следующем порядке: $Na_2O \rightarrow K_2O \rightarrow B_2O_3 \rightarrow$ $\rightarrow Li_2O$. Величина работы адгезии опробованных алюмосиликатных стекол к поверхности карбида кремния составляет 215—600 эрг/см^2; повышение температуры увеличивает работу адгезии.

Для изучения изменений, происходящих на контакте карбида кремния со связкой, был применен локальный лазерный микроспектральный анализ и электронный микрорентгеноспектральный анализ.

Локальный микроспектральный анализ производили на установке системы Королева [96] при возбуждении микропроб "гигантскими" лазерными импульсами (серия из шести импульсов), спектры фотографировались на кинопленку УФШ-0 чувствительностью 1000 единиц. Образцами служили разрезы пластинчатых кристаллов карбида кремния с расплавленной на их поверхности связкой, шлифованные и полированные по методике [214].

Анализу подвергались два вида образцов:

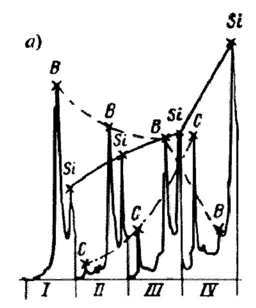
образец, на котором анализировались участки чистой связки, границы кристалл SiC — связка и участки SiC, расположенные на различных расстояниях от границы раздела фаз;

образец, с которого была удалена расплавившаяся связка и анализировалась чистая поверхность SiC и поверхность SiC с оставшейся связкой.

Интенсивность аналитических линий в полученных спектрах измеряли на двухлучевом регистрирующем микрофотометре ИФО-451. Регистрограммы спектральных линий приведены на рис. 2.25.

Электронный микрорентгеноспектральный анализ проводился на приборе Cameca по методике [97]. Изучалось изменение концентрации элементов, входящих в связку (Si, B), и элементов, входящих в карбид кремния (Si, C).

При исследовании лазерных спектров анализируемых образцов и рассмотрении полученных регистрограмм обнаружено, что интенсивность линий бора B



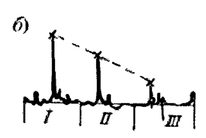


Рис. 2.25. Регистрограммы спектральных линий Si, B, C и Na в спектрах различных микроучастков исследованного образца, полученных на лазерной микроспектральной установке:

а — интенсивность спектральных линий B 249,7 нм; Si 250,7 нм; C 247,8 нм; *б* — интенсивность спектральной линии Na 330,2 нм; *I* — участок связки; *II* — граница связки и SiC; *III* — 20 мкм от границы; *IV* — 40 мкм от границы

в спектрах микроучастков карбида кремния уменьшается с удалением зоны исследования от связки. Линия B наблюдается еще в спектре микроучастка карбида кремния, находящегося на расстоянии до 40 мкм от границы SiC со связкой. Изменение интенсивности спектральной линии бора как в радиальном направлении, так и на глубину на расстояние 40 мкм позволяет сделать вывод о наличии диффузии бора из связки в карбид кремния.

При проведении электронного микрорентгеноспектрального анализа также обнаружена диффузия бора из связки в карбид кремния на глубину 25–30 мкм. Диффузия элементов из карбида кремния в связку не наблюдалась. Линии Li, Na, K наблюдались в спектре микроучастка карбида кремния, находящегося на расстоянии 20 мкм от границы зерна SiC со связкой [98].

Таким образом, установлено, что алюмосиликатные стекла адгезионно-активны по отношению к карбиду кремния; содержащийся в них бор диффундирует в кристаллы SiC, что улучшает их сцепление со связкой; разложение карбида кремния алюмосиликатными стеклами не обнаружено. Все это позволяет рекомендовать алюмосиликатные стекла в качестве основных компонентов керамических связок в производстве абразивного инструмента из карбида кремния.

Исследование влияния борных стекол на физико-механические свойства абразивного черепка из карбида кремния

Для изучения влияния борных стекол на физико-механические свойства абразивного черепка было исследовано три состава стекол с различным содержанием оксида бора B_2O_3 (табл. 2.63) [99].

Стекла вводили в состав связки за счет уменьшения содержания полевого шпата, при этом количество глины оставалось постоянным и составляло 20 %. Вещественный и химический составы исследуемых связок представлены в табл. 2.64 и 2.65.

Сравнение физико-механических свойств образцов, изготовленных на исследуемых связках и на промышленной связке К3, проводили на стандартных образцах-"восьмерках" из зеленого карбида кремния зернистостью 40 структуры 7 с содержанием связки 10, 15, 20, 25 и 30 вес. ч. на 100 вес. ч. зерна.

Обжиг образцов производили в силикатовой печи с вращающимся подом при оптимальной для каждой связки температуре с двухчасовой выдержкой при конечной температуре.

Структура связки обожженных образцов анализировалась микроскопическим методом в полированных шлифах в отраженном свете, а также в иммерсионных

Таблица 2.63

Химический состав борных стекол

Номер стекла	Содержание, вес. %					
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Na_2O	K_2O	п.п.п
1	72,48	4,26	15,92	2,82	4,02	0,50
2	68,52	3,70	20,47	2,62	4,06	0,63
3	58,50	7,20	26,80	2,40	3,88	1,22

Таблица 2.64

Шихтовой состав связок и огнеупорность

Марка связки	Содержание, вес. %					Огнеупорность, °С
	Полевой шпат	Глина латнинская	Стекло			
			1	2	3	
3К	70	30	–	–	.	1430
70–1	70	20	10	–	–	1300
60–1	60	20	20	–	–	1260
70–2	70	20	–	10	–	1280
60–2	60	20	–	20	–	1230
50–2	50	20	–	30	–	1220
40–2	40	20	–	40	.	1200
70–3	70	20	–	–	10	1280
60–3	60	20	–	–	20	1230
40–3	40	20	–	–	40	1200

Таблица 2.65

Химический состав связок

Марка связки	Содержание, вес. %									
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	B_2O_3	п.п.п.
3К	60,54	22,94	1,15	0,59	0,33	0,36	2,57	7,55	–	3,97
70-1	63,58	19,87	0,93	0,41	0,23	0,25	2,76	7,91	1,59	2,47
60-1	63,89	18,51	0,86	0,40	0,20	0,23	2,60	7,25	3,18	2,88
70-2	62,68	19,69	0,93	0,43	0,24	0,31	2,46	7,88	2,04	3,34
60-2	62,60	18,35	0,86	0,44	0,22	0,35	2,62	7,25	4,08	3,23
50-2	63,12	16,93	0,79	0,48	0,21	0,24	2,63	6,59	6,14	2,87
40-2	63,34	15,40	0,71	0,47	0,24	0,22	3,22	5,92	8,18	2,30
70-3	61,61	20,06	0,93	0,42	0,25	0,25	2,80	7,79	2,68	3,12
60-3	60,36	18,93	0,86	0,42	0,23	0,24	2,85	7,22	5,36	3,53
40-3	59,14	16,73	0,71	0,44	0,20	0,22	2,78	5,47	10,72	3,59

препаратах. Результаты определения механической прочности и твердости образцов представлены в табл. 2.66.

Введение алюмоборосиликатного стекла в керамический состав на основе полевой шпат — глина от 10 до 40 вес. % приводит к снижению огнеупорности связок от 1430 до 1200 °С (см. табл. 2.66), повышает механическую прочность и твердость абразивных черепков по сравнению с образцами, изготовленными на связке К3 по аналогичной рецептуре. При этом количество связки, вводимой в образец на 100 вес. ч. зерна для получения определенной твердости, в среднем на 30 % меньше, чем при использовании промышленной связки К3, а прочность при одинаковой твердости также увеличивается. При увеличении содержания в стекле B_2O_3 от 15 до 25 % прочность образцов повышается

Таблица 2.66

Физико-механические свойства образцов, вес. ч.

Марка связки	Прочность на разрыв, МПа	Твердость по ГОСТу	Прочность на разрыв, МПа	Твердость по ГОСТу	Прочность на разрыв, МПа	Твердость по ГОСТу	Прочность на разрыв, МПа	Твердость по ГОСТу	Прочность на разрыв, МПа	Твердость по ГОСТу	Оптимальная температура обжига, °С
	10		15		20		25		30		
3К	1,4	–	2,4	–	4,2	М1	–	–	6,6	СМ2	1250
70-1	2,4	ВМ1–ВМ2	4,9	М1	5,5	М3	–	–	8,4	С1	1250
60-1	3,6	ВМ1–ВМ2	4,9	М1	6,0	М3	–	–	8,6	С1	1250
70-2	5,2	М1	6,0	М2	8,4	СМ1	8,8	СМ2	9,2	С1	1250
60-2	5,3	М1	5,4	М2	7,2	СМ1	8,6	СМ2	9,6	С1	1250
50-2	5,2	М1	5,4	М2	9,2	СМ2	12,0	С2	Не определялось		1200
40-2	Не определялось				8,6	СМ1	8,4	С1	10,4	С1	1200
70-3	5,5	М1	6,0	М2–М3	7,0	СМ1	8,6	СМ2	9,0	С1	1250
60-3	6,0	М1	6,2	М2–М3	7,6	СМ1	8,7	СМ2	9,2	С1	1250
40-3	Не определялось				7,4	СМ1	Не определялось		10,0	С1	1150

при одинаковом вещественном составе связок (см. табл. 2.66, связки 60-1, 60-2, 60-3), особенно при содержании связки 10, 15 и 20 вес. ч. на 100 вес. ч. зерна.

Микроструктура черепка, изготовленного на связке К3, характеризуется неравномерным распределением связки; она образует неправильной формы скопления, примазки на зернах SiC, мостики между зернами. В связке стекловатая составляющая тонкой пленкой обволакивает реликтовые зерна исходных компонентов (рис. 2.26). Добавка 20 вес. % алюмоборосиликатного стекла изменяет характер связки и ее распределение в черепке: связка состоит из стекла, в котором заключены незначительные неусвоенные реликты зерен кварца и связка плавно обволакивает зерна, образуя между ними узкие мостики (рис. 2.27).

Результаты проведенного исследования позволяют заключить, что введение борных стекол в керамическую связку на основе полевой шпат — огнеупорная глина способствует увеличению механической прочности и твердости абразивного черепка из зеленого карбида кремния, улучшает его структуру и позволяет изготовлять инструмент твердых степеней твердости без зачернения абразивного черепка.

Для оптимизации состава борсодержащей керамической связки был использован центральный композиционный план и разработан алгоритм расчета на ЭВМ.

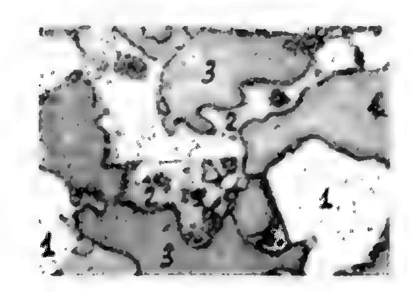


Рис. 2.26. Микроструктура черепка, изготовленного на связке К3 (свет отраженный, увеличение ×100):
1 – зерна SiC; *2* – связка; *3* – поры

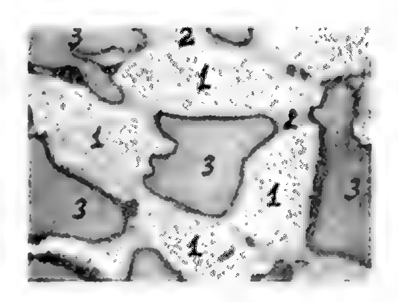


Рис. 2.27. Микроструктура черепка с добавкой 20 вес. % алюмоборосиликатного стекла (свет отраженный, увеличение ×100):
1 – зерна SiC; *2* – связка; *3* – поры

В качестве критерия оптимизации была принята глубина лунки по пескоструйному прибору, которая, как известно, коррелируется с прочностью, а также отсутствие зауглероженности при температуре обжига 1250–1280 °С. В качестве ограничения принималось допустимое значение прочности не ниже 6,0 МПа. Максимальное значение прочности 86–91 МПа при твердости СМ2 возможно получить при следующем соотношении компонентов в керамической связке, %: полевой шпат — 50–55, огнеупорная глина — 23–30, борсодержащая фритта — 23–30. Керамическая связка имеет следующий состав, вес. %: Al_2O_3 17–22, MgO 0,68–0,73, K_2O + Na_2O 5–7, B_2O_3 2,8–4,0, SiO_2 остальное [100].

Влияние борно-литиевых стекол в составе связки на физико-механические свойства абразивного черепка из карбида кремния

Влияние введения борлитиевых стекол в шихту, состоящую из полевого шпата и огнеупорной глины, проводилось с использованием борлитиевых стекол, состав которых представлен в табл. 2.67 [101].

Шихтовой состав исследуемых связок приведен в табл. 2.68, химический состав — в табл. 2.69. Все образцы для исследования изготавливались по рецептуре, приведенной в табл. 2.70. Образцы, изготовленные с применением борлитиевых стекол, сравнивались с образцами на связке К3 и борсодержащей связке К10. Обжиг образцов производили в силитовой печи с вращающимся подом при температуре 1250 °С с двухчасовой выдержкой.

Таблица 2.67

Химический состав стекол

Борлитиевое стекло	Содержание, %						
	SiO_2	Al_2O_3	Ba_2O_3	K_2O	Na_2O	Li_2O	Примеси
№ 1	65,94	3,91	19,62	2,60	4,06	3,21	0,66
№ 2	64,48	3,71	19,84	2,40	3,80	4,96	0,91

Таблица 2.68

Шихтовой состав связок

Связка	Содержание, вес. %			
	Белогорский шпат	Латненская глина	Борное стекло	Борлитиевое стекло
Борлитиевая	55	25	–	20
К3	70	30	–	–
К10	55	25	20	–

Таблица 2.69

Химический состав связок

Связка	Содержание, вес. %										
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Li_2O	п.п.п.
Борлитиевая											
Стекло № 1	61,40	19,30	3,92	0,93	0,47	0,26	0,88	2,88	6,85	0,62	3,49
Стекло № 2	61,06	19,26	3,96	0,93	0,47	0,26	0,88	2,34	6,70	1,09	4,05
К10	62,75	19,10	3,38	0,93	0,51	0,63	1,24	3,27	6,77	–	3,59
К3	60,54	22,94	–	1,15	0,59	0,33	0,36	2,57	7,55	–	3,97

Таблица 2.70

Рецептура образцов для исследования

Номер рецепта	Состав смеси, вес.ч.				Структура	Объемный вес, г/см^3
	Зерно	Связка	Сухой декстрин	50 %-ный раствор декстрина		
1	100	10,0	2,0	3,2	7	1,76
2	100	15,0	2,0	3,5	7	1,85
3	100	20,0	2,0	4,0	7	1,94
4	100	25,0	1,5	4,5	7	2,01
5	100	30,0	1,0	5,0	7	2,09

Микроструктура связки в обожженных образцах анализировалась микроскопическим методом в аншлифах и в иммерсионных препаратах. Исследование распределения основных элементов в мостике связки проводилось микрорентгеноспектральным анализом.

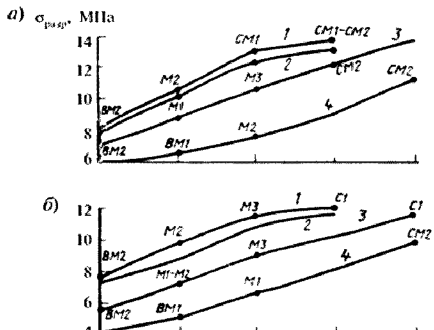
В табл. 2.71 приведены физико-механические свойства абразивных черепков, изготовленных с применением исследованных связок (количество связки 20 вес. ч., рецепт 3), а на графиках рис. 2.28, 2.29 — зависимость пределов прочности на разрыв и изгиб от состава исследованных связок, их количества в абразивном черепке (рецепты 1—5) и зернистости карбида кремния.

Как следует из данных табл. 2.71 и рис. 2.28, 2.29, введение в керамическую связку Li_2O увеличивает механическую прочность абразивного черепка

Таблица 2.71

Физико-механические свойства абразивных черепков

Связка	Зернистость карбида кремния зеленого 64С	Твердость образцов по ГОСТу	Предел прочности		Модуль упругости, МПа·10 [7]
			на разрыв ($\sigma_{разр}$), МПа	на изгиб ($\sigma_{изг}$), МПа	
Борлитиевая № 1	40	М3	8,1	22,8	5,48
	25	М3	10,9	31,8	5,96
	16	М3	12,3	38,9	6,12
Борлитиевая № 2	40	СМ1	8,9	22,7	5,69
	25	СМ1	11,5	33,2	6,31
	16	СМ1	13,3	39,9	6,35
К3	40	М1	4,8	14,3	3,38
	25	М1	6,7	18,9	3,82
	16	М2	7,6	21,6	4,15
К10	40	М3	7,6	19,5	5,26
	25	М3	10,3	22,9	5,46
	16	М3	12,1	31,8	5,79



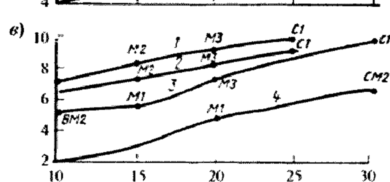


Рис. 2.28. Предел прочности на разрыв $\sigma_{разр}$ образцов из карбида кремния зернистостью 16 (*а*), 25 (*б*) и 40 (*в*) различной твердости структуры 7 на различных связках:

1, *2* — борлитиевые связки № 2 и 1 соответственно; *3* — связка К10; *4* — связка К3

из SiC по сравнению с борсодержащей связкой К10, а тем более по сравнению со связкой К3.

Так, по сравнению с образцами на связке К10 при твердостях от ВМ2 до М3 прочность на разрыв на борлитиевых связках повышается на 20–25 %, а прочность на изгиб — на 16–20 %, а по сравнению с образцами на связке К3 при твердостях от М1 и выше прочность на разрыв и изгиб образцов на борлитиевых связках возрастает в 2–2,5 раза.

Повышение прочности абразивного черепка происходит на образцах, изготовленных на всех зернистостях карбида кремния, причем если прочность образцов на связке К3 возрастает постепенно с увеличением ее содержания в черепке, то для образцов на борсодержащей и борлитиевых связках резкое увеличение прочности наблюдается при твердостях от ВМ2 до М3, а затем прочность возрастает незначительно. Повышение содержания борлитиевых связок в абразивном черепке свыше 25 вес. ч. нецелесообразно, так как приводит к зауглероженности последнего. Повышение содержания в связке Li_2O от 0,46 до 0,91 % увеличивает прочность образцов на разрыв и изгиб на 12–14 %. Борлитиевые связки повышают также и модуль упругости абразивного черепка.

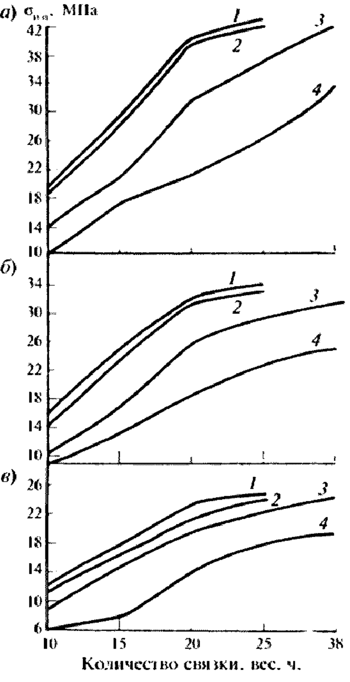


Рис. 2.29. Предел прочности на изгиб $\sigma_{и.п}$ образцов из карбида кремния зернистостью 16 (*а*), 25 (*б*) и 40 (*в*) различной твердости структуры 7 на различных связках:

1, *2* — борлитиевые связки № 2 и 1 соответственно; *3* — связка К10; *4* — связка К3

На рис. 2.30 показана микроструктура черепка зернистостью № 40, изготовленного на связках К3, К10, борлитиевых № 1 и 2. Микроструктура черепка, изготовленного на связке К3, свидетельствует о неравномерном распределении связки, практически не обволакивающей зерна карбида кремния. Наличие борного стекла в связке К10 изменяет характер связки и ее распределение в черепке; связка представлена стеклом, обволакивающим значительную поверхность зерен карбида кремния. Введение борлитиевого стекла в связку способствует растеканию ее по всей поверхности зерен карбида кремния в черепке; связка более однородна и подвижна, чем связки К3 и К10.

На рис. 2.31 показаны диаграммы распределения алюминия и кремния в промышленной связке К3 (см. рис. 2.31, *а*) борсодержащей связке К10 (см. рис. 2.31, *б*), борлитиевой № 1 (см. рис. 2.31, *в*). Кривые распределения кремния и алюминия, особенно алюминия, в связке К3 свидетельствуют о наличии в связке неассимилированных зерен кварца и скопления глинистого вещества.

Рис. 2.30. Микроструктура черепка карбида кремния, изготовленного на связках К3 (*а*), К10 (*б*) и на борлитиевой связке № 2 (*в*) (свет отраженный, увеличение ×100):

1 — зерна карбида кремния; *2* — поры; *3* — связка

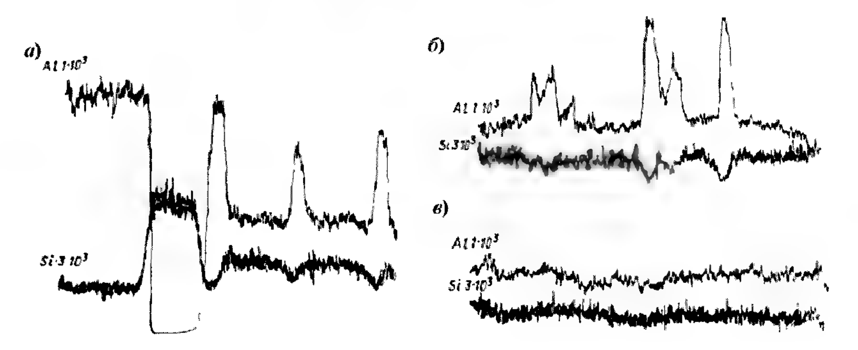


Рис. 2.31. Диаграммы распределения мостиков связки:

а — связка К3; *б* — связка К10; *в* — связка борлитиевая

Введение в связку B_2O_3 способствует более равномерному распределению в связке кремния и алюминия, причем кремния лучше (в связи с растворением зерен кварца), чем алюминия (см. рис. 2.31, *б*). Введение в борсодержащую связку Li_2O приводит к равномерному распределению алюминия и кремния в массе связки.

Для определения эксплуатационных показателей абразивного инструмента на борлитиевой связке был изготовлен инструмент 1 100 × 65 × 20 64С16М3 (связка состава № 2) и испытан в производственных условиях одного из заводов на операции затылования заборных и обратных конусов специальных метчиков из кобальтовых и ванадиевых сталей новых марок. Установлено, что круги на этой связке обеспечивают бесприжоговое шлифование инструмента и превосходят применяемый на заводе стандартный абразивный инструмент из электрокорунда по производительности в 1,3 раза, а по периоду стойкости — в 3 раза и более.

Таким образом, введение борлитиевых стекол в состав керамических связок для абразивного инструмента из карбида кремния способствует дальнейшему повышению физико-механических свойств.

ВаО-содержащие связки

Имеющиеся в литературе сведения о влиянии соединений бария на стойкость карбида кремния касаются технологии изготовления карбидокремниевых огнеупоров и нагревателей. В работе [102] установлено, что карбидокремниевые смеси с добавкой барита в обжиге практически до 1400 °С не зачерняются и более устойчивы к атмосфере печных газов.

Авторами [103] изучено взаимодействие карбида кремния с оксидом бария и ВаО-содержащей связкой. В качестве носителя оксида бария в ВаО-содержащей связке использовались бариевые стекла, а в качестве материала был взят карбид кремния зеленый зернистостью № 40 (98,97 % SiO_2, 0,02 % SiC, 0,087 % $Si_{св}$, 0,10 % Fe и 0,04 % $C_{св}$).

В эксперименте были использованы также оксид бария и пять видов керамических связок, состоящих из смеси огнеупорной латненской глины, полевого шпата и бариевого стекла в количествах 20, 60 и 20 % (по массе). При этом содержание ВаО в бариевом стекле составляло 10, 15, 20, 25 и 30 %, а содержание оксида бария в связках — от 2 до 6 % соответственно.

Навески указанных материалов в смеси с карбидом кремния в соотношении 1 : 1 подвергались термической обработке в воздушной среде при 1250 и 1300 °С с выдержкой 2, 6 и 15 ч. В полученных образцах петрографическим методом в аншлифах и иммерсионных препаратах анализировалось состояние смесей, новообразования в них и на контакте с карбидом кремния, состояние поверхности зерен последнего.

Термическая обработка карбида кремния во всех вышеуказанных смесях сопровождается сильным протравливанием поверхности зерен и образованием червеобразных углублений. Смеси карбида кремния с оксидом бария после обжига представлены силикатами бария (рис. 2.32). В зависимости от температуры и продолжительности выдержки эти силикаты имеют различный химический состав и находятся в различном количественном отношении друг с другом. В смесях карбида кремния с ВаО-содержащими связками стекло ока-

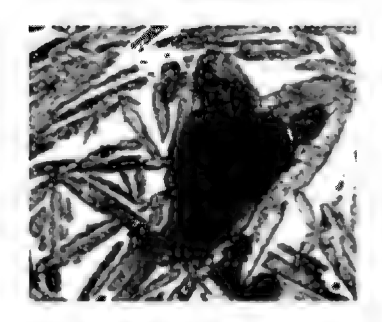


Рис. 2.32. Структура смеси карбида кремния с оксидом бария после термообработки при 1300 °С с выдержкой 6 ч (свет отраженный, увеличение ×200)



Рис. 2.33. Структура смеси карбида кремния с BaO-содержащей связкой после термообработки при 1250 °С с выдержкой 6 ч (свет проходящий, увеличение ×300)

зывается тоже закристаллизованным силикатами бария, хотя и в меньшей степени (рис. 2.33). Степени силикатообразования в этих смесях, так же как и физико-механические свойства образцов, изготовленных на этих связках, оказываются очень близкими друг к другу и почти не зависят от количества оксида бария в связке. Поэтому для приведенной ниже оптимизации состава BaO-содержащей связки было взято применяемое в абразивной промышленности Ва-стекло с содержанием в нем 10 %-ного оксида бария.

Несмотря на то что с увеличением содержания оксида бария в BaO-содержащих связках с 2 до 6 % BaO огнеупорность их снижается с 1280 до 1200 °С, зачернение и вспучивание в образцах появляется только с введением предельного количества связки (38 вес. ч.) при обжиге при температуре 1280 °С.

Авторами был проведен сравнительный петрографический анализ образцов на применяемых в промышленности связках и связках, содержащих повышенное количество оксида бария, и обнаружено, что зачерненность является следствием образования не только свободного кремния, но и вторичного карбида кремния (рис. 2.34). Это свидетельствует о первичности разложения карбида кремния при обжиге, предшествующего окислению продуктов разложения.

Резкое снижение степени зачернения образцов на BaO-содержащих связках, очевидно, вызвано тем, что оксид бария способствует окислению свободного кремния и связывает получающийся кремнезем в силикат бария (рис. 2.35).

Оптимизация состава BaO-содержащей связки проведена на ЭВМ "Мир-1". План оптимального эксперимента представлял собой комбинацию плана Шеффе второго порядка и восьми точек внутри треугольника. Методика определения оптимального состава связки для каждого свойства в отдельности базируется на применении метода конфигураций при наличии ограничений по параметрам и значениям отдельных физико-механических свойств. Определялись прочность на разрыв и изгиб, твердость и частота продольных колебаний для расчета динамического модуля упругости. По полученным значениям стро-

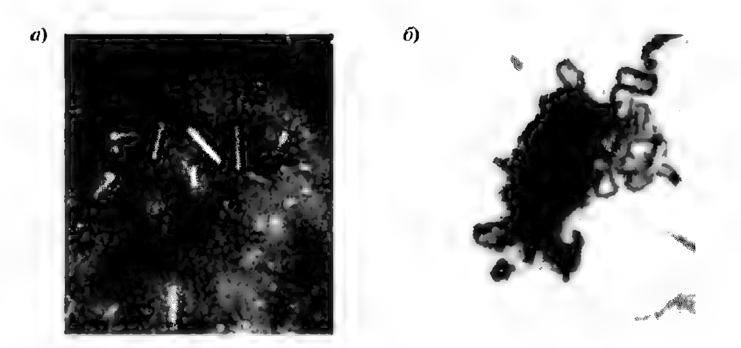


Рис. 2.34. Вторичный карбид кремния (темный цвет) в абразивном черепке с зачернением:

а — отраженный свет, увеличение ×2000; *б* — проходящий свет, увеличение ×400

ились изолинии физико-механических свойств обожженных черепков из карбида кремния в треугольнике составов ВаО-содержащей связки.

Из рассмотрения диаграмм зависимости твердости и динамического модуля упругости обожженных черепков от состава их связок для всех трех зернистостей оптимальной можно считать область следующих составов, %: *X*1 55—71, *X*2 8—20, *X*3 15—28, где *X*1, *X*2, *X*3 — процентное содержание в связке полевого шпата, глины и ВаО-стекла соответственно. При этом прочность абразивного черепка на разрыв и изгиб будет такой:

для карбида кремния № 16 — не менее 10,5 и 28,0 МПа;

для карбида кремния № 25 — не менее 7,0 и 22,0 МПа;

для карбида кремния № 40 — не менее 6,0 и 13,5 МПа.

Для установления окончательного состава связки необходимо принять во внимание не учтенные при планировании эксперимента технологические факторы, а именно необходимую прочность сырца (не менее 0,03 МПа), степень

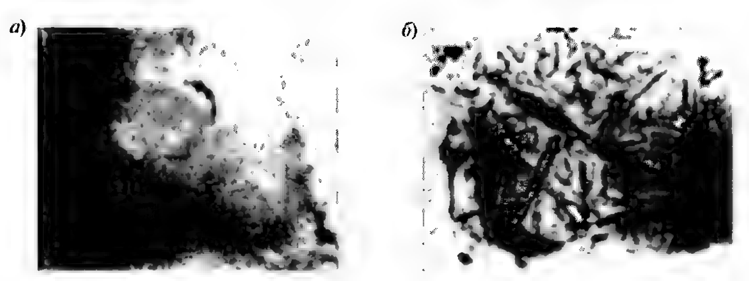


Рис. 2.35. Связки в абразивном черепке из карбида кремния (свет проходящий, увеличение ×400):

а — с зачернением (стекло связки насыщено черными частицами кремния);
б — без зачернения при добавлении в связку оксида бария (кристаллы силиката бария в стекле)

возможной зауглероженности образцов при твердости выше СТ1 и др. Поэтому область технологических составов связки несколько сужается, оптимальный шихтовой состав связки становится следующим: 15–25 % огнеупорной глины, 50–70 % полевого шпата, 15–25 % бариевого стекла, что соответствует химическому составу связки, %: SiO_2 56,0–63,0, Al_2O_3 14,0–23,0, $Na_2O + K_2O$ 5,5–8,0, BaO 1,5–2,6, остальное — примеси TiO_2, MgO, CaO, Fe_2O_3 и др. [104].

В табл. 2.72 представлены физико-механические свойства образцов из карбида кремния зернистостью № 16, 20 и 40 на 20 вес. ч. промышленной связки К3, борлитиевой связки К10 и двух BaO-содержащих связок (составы связок лежат в вышеуказанной области).

Из данных таблицы видно, что прочность образцов на разрыв и изгиб на BaO-содержащих связках в среднем на 46 % выше соответствующих показателей образцов, изготовленных на связке К3. По сравнению с образцами на связке К10 на BaO-содержащей связке прочность возрастает только на 11 %, однако резко уменьшаются их деформация и зауглероженность при твердости СТ1–СТ3.

Сравнительные эксплуатационные испытания абразивного инструмента из карбида кремния на BaO-содержащей связке и на связке К3 были проведены в лабораторных условиях НИИТа при шлифовании лопаток компрессора из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9 и ВТ22 абразивными кругами диаметром 250–350 мм и твердостью СМ1–СМ2. Результаты испытаний показали, что кромкостойкость инструмента на BaO-содержащей связке на 30 % выше кромкостойкости инструмента на связке К3, а удельная производительность шлифования выше на 15–20 %.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

добавка оксида бария в керамическую связку для карбида кремния приводит к упрочнению обожженного черепка вследствие силикатообразования на границе зерно—связка;

при зачернении черепка из карбида кремния на керамических связках происходит не только отложение свободного кремния, но и образование вторичного карбида кремния;

Таблица 2.72

Физико-механические свойства образцов

Механические свойства	Номер зернистости	Связки			
		К3	К10	BaO-содержащие	
				1	2
Прочность на разрыв, МПа	40	4,8	7,6	7,8	8,2
	25	6,7	9,8	11,1	11,7
	16	7,6	12,1	14,0	14,0
Прочность на изгиб, МПа	40	14,9	19,5	20,3	21,0
	25	18,9	22,9	28,4	29,2
	16	21,3	31,8	37,1	40,0
Твердость по ГОСТ	40	М1	М3	М3	М3
	25	М1	М3	СМ1	СМ1
	16	М2	М3	СМ1	СМ1

оксид бария предохраняет абразивный инструмент из карбида кремния от зачернения вследствие связывания продуктов разложения карбида кремния в силикаты бария;

примерно одинаковое значение физико-механических свойств абразивного черепка из карбида кремния можно получить в широком диапазоне составов связки.

Взаимодействие карбида кремния с СаО-содержащими материалами (волластонитом)

В 1961 г. С.Г. Воронов и Э.Э. Тележкина впервые применили волластонит (метасиликат кальция) в качестве компонента керамической связки для карбида кремния. Исследования показали, что прочность на разрыв абразивного черепка из SiC на волластонитовой связке при одинаковой твердости лишь на 10–15 % выше, чем прочность на разрыв черепка на промышленной связке К3, однако новый инструмент имел повышенные эксплуатационные свойства. Так, при шлифовании ножей твердосплавных фрез съем металла увеличился на 50 %, а удельная производительность — в среднем в 1,5 раза. Испытания, проведенные в 1970–1972 годах при шлифовании стержней болтов из сплава ВТ-16, а также при круглом наружном шлифовании (в центрах) металлорежущего инструмента из кобальтовых и ванадиевых быстрорежущих сталей новых марок, показали значительное преимущество абразивного инструмента на волластонитовой связке.

Нам представлялось, что положительный эффект при эксплуатации инструмента из карбида кремния на волластонитовой связке вызван упрочнением связи между карбидом кремния и связкой за счет образования промежуточного контактного слоя.

Для изучения взаимодействия карбида кремния 64С40 с СаО-содержащими материалами были использованы волластонитовый концентрат Кайташского месторождения, керамическая связка (30 % огнеупорной латненской глины, 58 % белогорского полевого шпата и 12 % волластонитового концентрата) и порошкообразный оксид кальция марки Ч (96 % CaO, 3 % $CaCO_3$). Зерно 64С40 состояло из 98,9 % SiC; 0,02 % SiO_2; 0,87 % $Si_{св}$; 0,10 % Fe; 0,04 % $C_{св}$ [105].

Химический состав волластонитового концентрата и волластонитовой связки приведен в табл. 2.73.

Навески этих материалов порознь и в смесях с карбидом кремния в соотношении 1 : 1 подвергались термической обработке в воздушной среде при температурах 1250 и 1350 °С с выдержкой 1 и 8 ч.

Таблица 2.73

Химический состав волластонитового концентрата и волластонитовой связки

СаО-содержащий материал	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	п.п.п.	Сумма
Волластонитовый концентрат	50,95	1,88	41,37	0,40	2,30	1,00	0,17	0,10	1,83	100,00
Волластонитовая связка	59,06	20,09	5,30	6,33	2,38	0,63	0,94	0,21	5,06	100,00

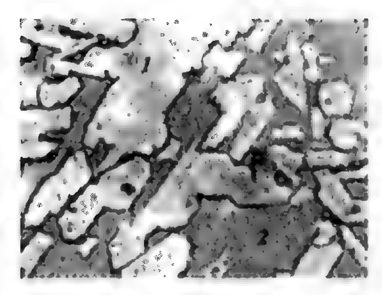


Рис. 2.36. Микрофотография волластонитового концентрата после термообработки при 1250 °С (свет отраженный, увеличение ×250):

1 — кристаллы волластонита; *2* — стекло

В полученных образцах петрографическим методом в аншлифах и иммерсионных препаратах анализировались состояние связки, новообразования в ней на контакте с карбидом кремния, изменение окраски карбида кремния, состояние поверхности его зерен до и после термической обработки. Аншлифы были использованы также для локального микроспектрального анализа в целях определения возможности проникновения кальция в карбид кремния в процессе термической обработки. Микрофотография волластонитового концентрата после термической обработки при 1250 °С представлена на рис. 2.36, где отчетливо видны кристаллы волластонита в стекле.

Термическая обработка карбида кремния в смеси с волластонитовым концентратом сопровождается изменением обычной светло-зеленой окраски SiC на молочно-голубую и травянисто-зеленую. Поверхность зерен карбида кремния сильно протравливается, на ней появляются червеобразные углубления. На границе зерна с волластонитовым концентратом отчетливо видно приконтактное минералообразование с размером кристаллов 3—4 мкм, растущих от зерна в стекло. Приконтактная зона самого карбида кремния несколько резорбирована.

На рис. 2.37 представлены микрофотографии образца, состоящего из смеси карбида кремния с волластонитовым концентратом после термической обработки при 1250 °С с выдержкой 8 ч.

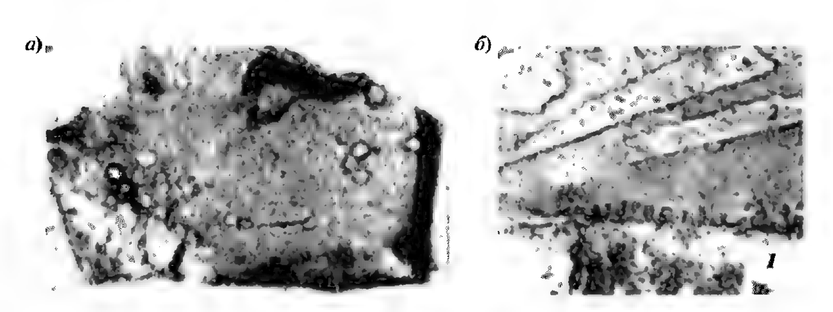


Рис. 2.37. Микрофотографии образца из смеси карбида кремния с волластонитовым концентратом:

а — протравленная поверхность зерна карбида кремния с червеобразными углублениями (свет проходящий, увеличение ×600); *б* — поверхность образца с отчетливой кристаллизацией на контакте зерна с волластонитовым концентратом (свет отраженный, увеличение ×800): *1* — зерно карбида кремния; *2* — волластонитовый концентрат; *3* — кристаллизация на границе зерна с волластонитом

Взаимодействие карбида кремния с волластонитовой связкой также приводит к изменению окраски SiC и протравливанию поверхности его зерен. При просмотре аншлифа с максимальным увеличением оптического микроскопа не удается обнаружить кристаллизацию связки и минералообразование на ее границе с карбидом кремния. Сама связка представлена неоднородным стеклом, что хорошо видно на рис. 2.38. Однако буроватая окраска приконтактной зоны карбида кремния и сноповидный эффект двупреломления на плоскости базиса [0001], как и в случае взаимодействия карбида кремния с волластонитовым концентратом, говорит о наличии в приконтактной зоне тончайших субмикроскопических новообразований, обнаружить которые можно, по-видимому, с помощью электронного микроскопа.

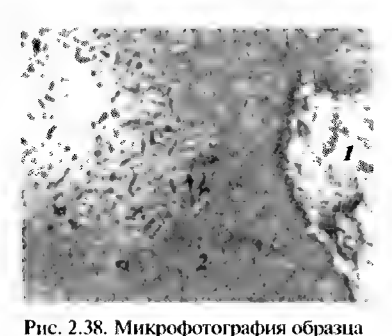


Рис. 2.38. Микрофотография образца из смеси карбида кремния с волластонитовой связкой после термообработки при 1250 °С с выдержкой 8 ч (свет отраженный, увеличение ×250):
1 — зерно карбида кремния; *2* — волластонитовая связка

Регистрограммы, полученные с помощью локального лазерного микроспектрального анализа, представлены на рис. 2.39. Из регистрограммы (см. рис. 2.39, *а*) видно, что при его взаимодействии как с волластонитовым концентратом

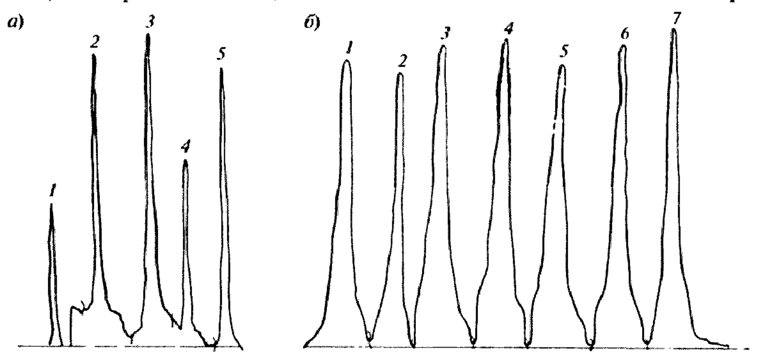


Рис. 2.39. Регистрограммы спектральной линии кальция (λ = 315,8 мк) в спектрах различных микроучастков зерна карбида кремния:

а — обработка в различных смесях при 1250 °С с различной выдержкой: *1* — исходное зерно карбида кремния, прокаленное с выдержкой 8 ч; *2, 3* — зерно, обработанное волластонитовым концентратом с выдержкой 1 и 8 ч соответственно; *4* — зерно, обработанное волластонитовой связкой с выдержкой 8 ч; *5* — зерно, обработанное порошкообразной CaO марки Ч с выдержкой 8 ч; *б* — обработка волластонитовым концентратом при различной температуре с выдержкой 1 ч: *1* — исходное зерно карбида кремния, прокаленное при 1250 °С; *2, 3* — центр зерна, обработанного при 1250 и 1350 °С соответственно; *4, 5* — периферия зерна, обработанного при 1250 и 1350 °С соответственно; *6, 7* — граница связки с зерном, обработанным при 1250 и 1350 °С соответственно

и волластонитовой связкой, так и с порошкообразным CaO происходит проникновение кальция в карбид кремния. Регистрограмма на рис. 2.39, *б* (температуры 1250 и 1350 °С, выдержка 1 ч) показывает проникновение кальция в зерно карбида кремния по его глубине. С увеличением температуры глубина проникновения кальция в зерно увеличивается.

Таким образом, можно считать, что улучшение свойств абразивного черепка из карбида кремния на керамической связке с добавлением CaO-содержащих материалов вызвано контактным минералообразованием на границе зерна карбида кремния с CaO-содержащей связкой.

С применением методики [106] был разработан оптимальный состав связки с использованием волластонитового концентрата: полевой шпат — 64–52 %, огнеупорная глина — 24–30 %, волластонитовый концентрат — 12–18 %. Прочность образцов, изготовленных на этой связке при ее содержании в количестве 20 вес. ч., составила 10,0–12,8 МПа при испытании на разрыв и 22,0–34,0 МПа — на изгиб (для черепка из 63С зернистостью № 16), 6,8–10,5 МПа — на разрыв и 22,0–27,0 МПа — на изгиб (для черепка 63С зернистостью № 25) и 6,0–7,2 МПа — на разрыв и 13,0–13,7 МПа — на изгиб (для черепка зернистостью № 40). При этом химический состав связки был таким, %: SiO_2 54–64, Al_2O_3 16–25, K_2O 4,5–8,0, Na_2O 1,5–6,0, CaO 6,0–17 [107].

Взаимодействие карбида кремния с алюмохромофосфатными связующими

Большой комплекс исследований проведен авторами [108] по применению алюмохромфосфатного связующего (АХФС) с активирующими добавками при изготовлении абразивного инструмента из зеленого карбида кремния.

Алюмохромфосфатное связующее, термообработанное при 600 °С, представляет собой стекло (n = 1,537±0,005). После обжига при 1000 °С преобладающая часть материала представлена мелкозернистыми, хорошо поляризующими кристаллическими агрегатами с n = 1,595±0,005, которые содержат фосфаты алюминия и хрома в виде метафосфата алюминия и метафосфата хрома. Включения и прожилки изотропной фазы с низким показателем преломления, присутствующие среди зерен метафосфатов, являются, очевидно, фосфокристобалитом. Обнаруженные единичные поляризующие кристаллы копьевидной формы с n < 1,500 могут быть отнесены к фосфотридимиту. В небольшом количестве присутствуют изотропные зерна (n = 1,545±0,005), являющиеся метафосфатом алюминия $AlPO_3$ формы А. Единичные призматические кристаллы и зерна ($n_р$ = 1,593±0,05 и $n_д$ = 1,605±0,005) могут быть отнесены к $AlPO_3$ формы С. При 1250 °С в пробе преобладают хорошо поляризующие кристаллические агрегаты с округлыми зернами размером от 3–6 до 100 мкм с показателем преломления n = 1,572±0,005. Они содержат фосфаты алюминия и хрома. Понижение суммарного показателя преломления этих агрегатов связано с увеличением в них метафосфата алюминия формы А в виде большого количества изотропной фазы среди поляризующих кристаллов (n = 1,545±0,005). Присутствуют также фосфокристобалит (n < 1,500), хорошо поляризующие зерна $AlPO_3$ формы С (n = 1,620±0,005) и поляризующие зерна пирофосфата алюминия $Al_4(P_2O_7)_3$ с n = 1,543±0,005. Обнаружены отдельные зерна пирофосфата хрома $Cr_4(P_2O_7)_3$, отличающиеся небольшим двупреломлением, имеющие

n = 1,740±0,005, и зерна α-$CrPO_4$, отличающиеся высоким двупреломлением и имеющие n > 1,760. Наличие стекла не установлено.

На термограмме АХФС (рис. 2.40, линия а) наблюдается большой эндотермический эффект в интервале 30–400 °С, связанный с потерей основного количества воды, в том числе и кристаллизационной, присутствующей в связующем. Оставшаяся вода при нагреве до 1000 °С постепенно выделяется.

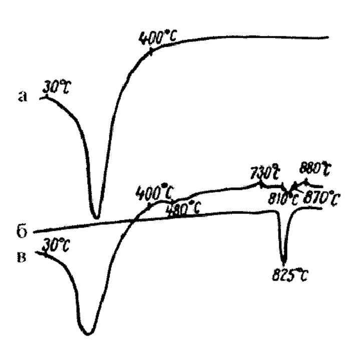


Рис. 2.40. Термограммы компонентов и смесей:

а — алюмохромофосфатное связующее (АХФС); б — углекислый барий $BaCO_3$; в — смесь АХФС + $BaCO_3$

Активатор твердения $BaCO_3$ (см. рис. 2.40, линия б) является тонкодисперсным материалом с высоким двупреломлением. Мелкие кристаллы $BaCO_3$ (витерита) имеют n = 1,678±0,001. После обжига до 600–1000 °С кристаллы укрупняются, показатель преломления не изменяется и равен 1,678±0,005. На термограмме (см. рис. 2.40, линия б) отмечен эндоэффект при температуре 825 °С, обусловленный модификационным переходом $BaCO_3$ из ромбической структуры в кубическую, чем, видимо, и объясняется укрупнение кристаллов витерита.

В смеси АХФС-$BaCO_3$ (см. рис. 2.40, линия в), высушенной при 20 °С, обнаружено наличие фосфатного стекла (n = 1,520±0,005) и мелких кристаллов $BaCO_3$, отличающихся высоким двупреломлением (n = 1,678±0,005). Обнаружены также мелкие кристаллы неправильной формы с двупреломлением в серых тонах и n = 1,640±0,005, которые могут быть отнесены к двузамещенному ортофосфату бария $BaHPO_4$. Наличие в смеси, высушенной при комнатной температуре, фосфатов бария подтверждает вывод о химическом взаимодействии, происходящем в опытных образцах, содержащих АХФС и активаторы твердения. Прочность сырца опытных образцов объясняется образованием новых фосфатных соединений, твердеющих при комнатной температуре.

При обработке смеси до 600 °С фосфатное стекло в результате потери воды имеет более высокий показатель преломления (n = 1,535±0,005). Присутствие неизменных кристаллов $BaCO_3$ (n = 1,678±0,005) способствует образованию субмикроскопических кристаллов в стекле, идентифицировать которые не удалось.

При 1000 °С фосфатное стекло полностью закристаллизовалось. Оно содержит изотропные субмикроскопические агрегаты и хорошо поляризующие кристаллы. В небольшом количестве сохраняются мелкие кристаллы $BaCO_3$. Изотропные субмикроскопические агрегаты имеют показатель преломления n = 1,575±0,005 и являются, по-видимому, фосфатными новообразованиями. Вокруг них наблюдаются участки стекла с таким же показателем преломления. Поляризующие кристаллы имеют n = 1,670±0,005 и могут быть отнесены к соединению типа карбоапатита бария $Ba_{10}(PO_4)_6CO_3$. Встречаются сростки этих кристаллов с субмикроскопическими агрегатами.

После обжига при 1250 °С в образце наблюдается темно-бурое аморфное вещество, содержащее включения поляризующих зерен (n = 1,615±0,005), которые могут быть отнесены к метафосфату алюминия формы С, а также присутствуют крупные поляризующие зерна с $n_р$ = 1,650 и $n_д$ = 1,675±0,005), которые могут быть отнесены к барийапатиту. В данной композиции, обработанной при различных температурах, в результате взаимодействия $BaCO_3$ с АХФС образуются фосфаты бария. При помощи микроскопического исследования были идентифицированы два барийфосфатных соединения: $BaHPO_4$ и $Ba_{10}(PO_4)_6CO_3$.

В результате термографического исследования композиции АХФС-$BaCO_3$ (см. рис. 2.40, линия в) обнаружены два явно выраженных эндоэффекта. Первый — в интервале температур 30—400 °С — обусловлен потерей воды, содержащейся в АХФС, второй — в интервале температур 810—860 °С — полиморфным переходом γ-$BaCO_3$ в α-$BaCO_3$. Промежуточные экзо- и эндоэффекты при температурах 480, 730 и 880 °С, по-видимому, вызваны реакциями взаимодействия АХФС и $BaCO_3$ с образованием промежуточных барийфосфатных соединений, которые не удалось идентифицировать кристаллооптическим методом.

Композиция АХФС — связка К3 — $BaCO_3$ при 1250 °С состоит из коричневого стекла, заполненного субмикроскопическими кристаллами. Показатель преломления стекла 1,489±0,005, показатель преломления участков, содержащих субмикроскопические кристаллы, n = 1,505±0,01. В отличие от композиции полевой шпат — АХФС — $BaCO_3$ кристаллизация в стекле только начинается, так как величина зерен составляет не более 1 мкм, лишь отдельные участки слабо поляризуют; фосфокристобалит неотличим от стекла. Единичные агрегаты зерен с высоким показателем преломления ($n \approx$ 1,650) могут быть отнесены к фосфатам бария. В незначительном количестве обнаружены зерна с n = 1,545±0,05. Сохраняются отдельные зерна полевого шпата и глины.

Очевидно, что алюмохромфосфатное связующее и активатор твердения $BaCO_3$ в смеси с керамической связкой К3 способствуют более полному спеканию компонентов при обжиге до 1250 °С, что приводит к однородности фазового состава керамической связки.

При изучении взаимодействия шлифзерен карбида кремния с керамической связкой К3 было показано, что во всем интервале температур 20—1250 °С какое-либо взаимодействие между ними отсутствует. Зерна карбида кремния механически закреплены в абразивном инструменте неоднородным расплавом связки.

Изучение композиции шлифзерно 63С25 — АХФС рентгенофазовым и термографическим методами показало, что в этой композиции также отсутствует взаимодействие компонентов. Однако кристаллооптические исследования композиции, обработанной при 1250 °С, показали, что образующиеся при этой температуре мелкие поляризующие фосфаты хрома и фосфаты алюминия образуют сростки с зернами карбида кремния. Образование таких сростков является еще одним положительным фактором введения АХФС в состав абразивной формовочной смеси, так как способствует более прочному удержанию шлифовального зерна в готовом изделии.

В табл. 2.74 приведены значения физико-механической прочности и твердости образцов на связке с применением АХФС и активирующих добавок по сравнению с образцами на связке К3, которые подтверждают вывод о положительном влиянии введения АХФС.

Таблица 2.74

Механическая прочность и твердость образцов из карбида кремния зеленого зернистостью 40 на керамической связке с применением АХФС и активирующих добавок при температуре обжига 1250 °С

Состав формовочной смеси на 100 вес. ч. зерна, вес. ч.	Предел прочности на изгиб, МПа	Твердость по ГОСТ 18118-79	
		Глубина лунки, мм	Степень твердости
Зерно 63 40 – 100 Связка К3 – 20 Сухой декстрин – 1 40 %-ный раствор декстрина – 4,0	14,3	3,7	М2
Зерно 63 40 – 100 Связка К3 – 15 Связки АХФС – 10–12	15,1	3,1	М3
Активирующие добавки			
Li_2CO_3 – 1,2	15,1	3,1	М3
K_2CO_3 – 1,2	16,3	3,4	М2
$MgCO_3$ – 1,2	18,5	3,3	М2–М3
$CaCO_3$ – 1,2	18,7	3,1	М3
$BaCO_3$ – 1,2	19,5–24,0	2,8	М3–СМ1

В работе [109] приведены результаты исследования введения фосфатов алюминия и хрома в качестве связки для смесей на основе SiC. Состав связки на основе фосфатов алюминия: не менее 32 % P_2O_5, не более 10 % Al_2O_3, отношение P_2O_5/Al_2O_3 3,0–3,2 моль/моль, плотность при 20 °С 1,45 г/см^3. Состав связки на основе фосфатов алюминия и хрома: не менее 32 % P_2O_5, не менее 7 % Al_2O_3, не менее 2,75 % Cr_2O_3, плотность при 20 °С 1,55 г/см^3. Установлено, что для изделий, обжигаемых при 600–800 °С, оптимальной является связка на основе фосфата алюминия, вводимая в количестве до 50 сверх 100 % остальных компонентов, а для изделий, обжигаемых при 400–600 °С, оптимальной является связка на основе алюминия и фосфата хрома, вводимая в количестве до 40 сверх 100 % остальных компонентов. Фосфатная связка обладает хорошей адгезией к керамике.

Таким образом, анализ результатов по разработке керамических связок для инструмента из карбида кремния позволяет потребителям выбрать оптимальную характеристику инструмента для определенных операций шлифования.

В табл. 2.75 представлены физико-механические свойства абразивных черепков из карбида кремния зернистостью 40–16 на различных связках (К3, К10, $CaO-BaO-Li_2O$-содержащих и алюмофосфатных), на которых можно абразивным заводам изготавливать инструмент практически без изменения технологических процессов, но с учетом особенностей керамических связок:

на связке К3 можно изготавливать все виды абразивного инструмента, в том числе твердостью СТ1–СТ3, Т1, Т2. При этом в инструменте на связке К3 содержится в 1,5–2 раза больше связки (при той же твердости), чем в инструменте на других связках, что приводит к уменьшению его пористости и понижению эксплуатационных показателей шлифкругов;

Таблица 2.75

Физико-механические свойства абразивных черепков из карбида кремния зернистостью 40–16 на различных связках

Номер зерна	Связка	Предел прочности на разрыв, МПа				Предел прочности на изгиб, МПа	Динамический модуль упругости $E \cdot 10^{-7}$, МПа				Степень твердости			
		Содержание связки в абразивном черепке, вес. %												
		15	20	25	30	20	15	20	25	30	15	20	25	30
40	К3	3,9	4,8	–	6,6	18,9	27,9	34,3	–	59,2	Менее ЧМ	М1	СМ2	СМ2
25	К3	5,0	6,7	–	9,9	18,9	29,9	38,8	–	63,2	Менее ЧМ	М2	С1	С1
16	К3	6,0	7,6	–	11,0	18,9	31,3	42,2	–	70,8	Менее ЧМ	М2	СМ2	СМ2
40	CaO-содержащая	5,0	7,4	–	8,8	20,6	36,6	50,8	–	63,8	М1	М2	–	С1
25		6,1	8,9	–	11,3	20,6	37,9	54,5	–	67,4	М1	М2	–	С1
16		7,2	10,9	–	13,5	20,6	38,6	55,9	–	72,0	М1	М3	–	С2
40	BaO-содержащая	5,7	7,7	–	9,3	23,4	41,2	50,7	–	69,6	М2	М3	С1	СТ1
25		7,1	9,0	–	10,5	23,4	41,8	54,8	–	73,5	М2	М3	С1	СТ2
16		8,3	11,9	–	13,1	23,4	44,5	55,9	–	75,0	М2	М3	С1	СТ1
40	К10	5,7	7,6	–	8,6	22,9	40,2	53,4	–	67,7	М2	СМ1	С1	СТ1
25	К10	6,7	10,3	–	10,4	22,9	40,8	55,8	–	74,5	М2	СМ2	С2	СТ2
16	К10	7,9	12,1	–	12,3	22,9	43,4	55,8	–	76,0	М2	СМ1	С2	СТ1
40	Li_2O-содержащая	6,9	8,9	10,0	–	33,2	42,8	57,8	6,75	–	М3	СМ1	С2	–
25		9,7	11,5	12,8	–	33,2	43,3	64,1	7,37	–	М3	СМ2	С2	–
16		10,3	13,3	13,3	–	33,2	46,0	64,5	7,41	–	М3	СМ2	С2	–
40	С применением АХФС	–	10,8	–	–	14,3–19,5	–	–	–	–	–	М3	СМ1	–
40	С применением углистых глин	–	11,8	–	–	15,1–20,0	–	–	–	–	–	М3	СМ1	–

на связках К10, CaO- и BaO-содержащих можно выпускать все виды абразивного инструмента твердостью до СТ3. Обжиг этого вида инструмента проводится как в газовых туннельных, так и в электрических щелевых печах при достаточном количестве O_2 и хорошем газообмене. Инструмент на CaO-содержащей связке имеет красивую зеленую окраску;

Li-содержащие связки наиболее предпочтительны при выпуске инструмента мягких твердостей (М1–СМ2). Инструмент на этой связке имеет высокий модуль упругости, что непосредственно связано с эксплуатационными свойствами инструмента (чем выше E, тем лучше работает инструмент) [110]. Обжиг этого вида инструмента целесообразно проводить в электрических щелевых печах;

освоение алюмохромфосфатных связок сдерживается из-за выделения неприятного запаха при изготовлении формовочных смесей из АХФС, удаление которого требует создания дополнительной мощной приточно-вытяжной вентиляции на существующих площадях производства;

инструмент на новых связках обеспечивает выпуск продукции при работе со скоростью $v_р$ = 45–50 м/с, а инструмент с улучшенными характеристиками — до 60 м/с.

Производственные испытания абразивного инструмента

Для определения эксплуатационных свойств инструмента на связке К10 опытные партии инструмента изготавливались на двух заводах по действующим технологическим процессам по опытной рецептуре. Для сравнения изготавливались также партии инструмента на связке К3. При этом серийно выпускаемые и опытные круги подбирались одинаковой твердости.

В табл. 2.76 представлена зависимость прочности и твердости абразивных черепков из карбида кремния зернистостью 40 от содержания в них связки.

Таблица 2.76

Зависимость прочности и твердости абразивных черепков из карбида кремния от содержания в них связки

Количество связки на 100 вес. ч. зерна, вес. ч.		Прочность на разрыв $\sigma_р$, МПа		Твердость черепка по ГОСТ 18118-89
Связка К3	Связка К10	Связка К3	Связка К10	
23	15	4,7	6,1	М1
25	18	5,7	6,8	М2
29	20	6,2	7,8	М3
32	22	6,6	8,4	СМ1
35	25	7,4	8,9	СМ2
38	28	10,0	11,0	С2
41	30,5	10,7	11,2	С2
44	34	11,1	11,4	СТ1
47	36	11,3	11,6	СТ2
50	38	12,4	12,2М1	СТ3

Как видно из табл. 2.76, для получения черепка твердостью до СМ2 количество связки К10 уменьшается (до 40 %) по сравнению с инструментом на связке К3, а механическая прочность при этом возрастает на 30 %. Для получения твердостей от СМ2 до СТ3 количество связки К10 уменьшается в среднем на 25 % при одинаковой прочности образцов на разрыв.

Сравнительные испытания инструмента на связках К10 и К3 производили на заводах-потребителях [111–112].

В табл. 2.77 приведены результаты производственных испытаний на операциях заточки резцов разного назначения, твердосплавных фрез диаметром 130–450 мм, наборных зенкеров, разверток, шлифования ножей, плоскости и наружного диаметра фрез, шлифования стрежня болтов, черновой заточки машинных разверток и т. п. из твердых сплавов марок ВК6, ВК8, Т15К10, Т15К6, а также составов ВК8 + сталь 45, ВК8 + сталь 9ХС, ВТ16 и т. д.

Как видно из табл. 2.77, стойкость опытного инструмента на связке К10 выше стойкости серийно выпускаемого инструмента на связке К3 в среднем на 50 %. Полученные результаты позволили заводам приступить к промышленному выпуску кругов на связке К10.

В работе [113] проведены исследования процесса шлифования труднообрабатываемых материалов — высокопроизводительных быстрорежущих сталей и высокопрочных титановых сплавов на операциях круглого наружного шлифования (с продольной подачей и врезанием) и бесцентрового врезного шлифования инструментом из SiC на промышленной связке К3 и на разработанных связках — волластонитовой и борлитиевой, а также по сравнению с инструментом из белого электрокорунда и монокорунда на связке К5.

Критерии оценки процесса шлифования: фактические скорости съема металла $Q_ф$ (мм³/мин) и износа круга $q_ф$ (мм³/мин), удельный съем металла $K = \dfrac{Q_ф}{q_ф}$ (мм³/мм³), стойкость круга T (мин). Показатели качества шлифованной поверхности: шероховатость R_a, R_z (мкм) и микротвердость H_V (кгс/мм²).

T–Q-зависимости, построенные по результатам экспериментов, свидетельствуют об исключительно низкой режущей способности абразивных инструментов на промышленных связках при обработке исследуемых сталей (рис. 2.41). При $Q > 1000$ мм³/мин период стойкости этих инструментов не превышает 1 мин, степень влияния скорости съема металла на период стойкости практически одинакова ($n = 1{,}0$–$1{,}4$). Круги из 63С на волластонитовой связке имеют значительно более высокую стойкость, особенно при $Q \geq 1000$ мм³/мин, степень влияния скорости съема металла при этом меньше ($n = 0{,}95$) (табл. 2.78).

Удельный съем металла K рассматривается в функции номинальной скорости съема металла Q, определяемой режимом резания: $K = \dfrac{C_k}{Q^m}$, где C_k и m — соответственно постоянная и показатель степени, определяемые условиями шлифования (см. табл. 2.78).

Из построенных по результатам K–Q-зависимостей (рис. 2.42) следует, что съем стали Р12Ф4К10М3 абразивными инструментами на промышленных связках низкий и в исследованном диапазоне скоростей съема металла находится

Таблица 2.77

Результаты сравнительных производственных испытаний абразивного инструмента из карбида кремния на связках К10 и К3

Операция	Характеристика абразивного круга на связке К10 структуры 7	Обрабатываемый материал	Оборудование	Режимы шлифования	Примечание
Заточка резцов	64С 40 СМ21 350 × 40 × 127 1 600 × 63 × 305	ВК8, Т15 К10	Заточные станки различных марок	$v_{кр}$ = 22–35 м/с. Подача ручная	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 в два раза выше стойкости абразивного инструмента на связке К3. Структурных изменений не наблюдалось
Заточка режущего инструмента с твердосплавными пластинами	1 300 × 40 × 127 64С 25 С1	ТК15 К6, ТК15 К10	Заточной станок	$v_{кр}$ = 33 м/с. $S_{пр}$ = 26 м/мин. $S_{поп}$ = 20 м/проход. Глубина резания 0,05–0,06 мм. СОЖ – эмульсол Э-2	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 в 1,1–1,3 раза выше стойкости абразивного инструмента на связке К3. Структурных изменений не наблюдалось
Заточка задней вспомогательной грани пластинки резца под углом 8±1 град	ЧЦ 250 × 100 × 150 64С 40 М3	Сталь 45 с пластинкой из твердого сплава	Заточной станок для резцов модели ЭБ-625	$v_{кр}$ = 13,1 м/с. Подача ручная. Глубина резания 0,2 мм. Машинное время 0,16 мин на 100 деталей	Удельная производительность абразивного инструмента на связке К10 на 28 % выше удельной производительности абразивного инструмента на связке К3
Заточка твердосплавных фрез диаметром 130, 300, 450 мм	64С 40 СМ1 ЧК 175 × 63 × 32 ЧК 200 × 63 × 32	ВК8 ВК8	Заточной станок фирмы Cincinnati	$v_{кр}$ = 28 м/с. Подача ручная Глубина резания 0,2–0,3 мм	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 в 1,5 раза выше стойкости абразивного инструмента на связке К3. Структурных изменений не наблюдалось
Заточка наборных зенкеров, разверток, фрез и других режущих инструментов	1 300 × 400 × 127 64С 25 СМ1, ЧТ 150 × 50 × 2 64С 40 СМ1	ВК6, ВК8, ТК15 К6, ТК15 Т10	Заточной станок SWMK 7 10	$v_{кр}$ = 26 м/с. Глубина резания 0,1–0,2 мм	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 на 25–30 % выше стойкости абразивного инструмента на связке К3
Шлифование плоскости ножей для фрез диаметром 315–400 мм	1 400 × 40 × 127 64С 40 М3 СМ1	ВК8	Плоскошлифовальный станок 3Б-722	$v_{кр}$ = 20 м/с. $S_{пр}$ = = 15 мм/ход. Глубина резания 0,01 мм. Машинное время 28 мин. СОЖ – 5 %-ная эмульсия	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 на 27 %, а удельная производительность на 72 % выше, чем инструмента на связке К3. Снизилось количество микротрещин и прижогов
Шлифование наружного диаметра фрез с пластинами из твердого сплава	1 300 × 40 × 127 64С 40 С2	ВК8 + сталь 9ХС	Универсальный шлифовальный станок 312М	$v_{кр}$ = 25 м/с. $S_{пр}$ = 1,5 м/с. $S_{поп}$ = 0,01 м/мин. Глубина резания 0,05 мм	–

Окончание табл. 2.77

Операция	Характеристика абразивного круга на связке К10 структуры 7	Обрабатываемый материал	Оборудование	Режимы шлифования	Примечание
Шлифование ножей для скоростных фрез	1 350 × 40 × 127 64С 40 СМ2	ВК8, Т15 К6	Плоскошлифовальный станок 372-Б	–	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 на 50 % выше стойкости абразивного инструмента на связке К3
Шлифование рабочей плоскости ножа фрезы	1 450 × 50 × 203 64С М3	Т15 К6	Плоскошлифовальный станок 3Б-722	$v_{кр}$ = 34 м/с. $S_{поп}$ = = 25 м/дв.ход. Число проходов 12. Глубина резания 0,025 мм. Машинное время 0,20 мин. СОЖ – 5 %-ный эмульсол	Удельная производительность абразивного инструмента на связке К10 на 12,5 % выше удельной производительности абразивного инструмента на связке К3
Шлифование ножей, оснащенных твердосплавными пластинами	1 450 × 50 × 203 64С М3	ВК8, Т15 К10	Плоскошлифовальный станок 3Б-722	$v_{кр}$ = 33 м/с. $S_{пр}$ = 26 м/мин. $S_{поп}$ = 20 м/проход. Глубина резания 0,05–0,06 мм. СОЖ – эмульсол Э-2	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 в 1,1–1,3 раза выше стойкости абразивного инструмента на связке К3
Шлифование стержня болтов размером 6 × 40 мм	1 350 × 58 × 127 64С 16 СМ2	ВТ16	Бесцентрово-шлифовальный станок 3Б-182	$v_{кр}$ = 35 м/с	Стойкость абразивного инструмента на связке К10 на 50–56 % выше стойкости абразивного инструмента на связке К3
Черновая заточка машинных разверток	1 600 × 63 × 305 64С 40 СМ2	ВК8	Круглошлифовальный станок	$v_{кр}$ = 30 м/с. Продольная подача ручная. Глубина резания 0,2 мм. СОЖ – 5 %-ная эмульсия	Стойкость абразивного инструмента для чернового шлифования на связке К10 в 1,2–1,5 раза выше стойкости абразивного инструмента на связке К3
Чистовая заточка машинных разверток	1 600 × 63 × 305 64С 25СМ1	ВК8	Круглошлифовальный станок	$v_{кр}$ = 30 м/с. Продольная подача ручная. Глубина резания 0,2 мм. Припуск на шлифование 0,2 мм	Стойкость абразивного инструмента на сравниваемых связках одинакова

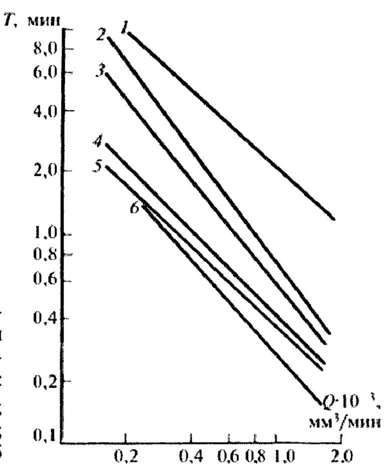


Рис. 2.41. Зависимость стойкости T от скорости съема металла Q при круглом наружном шлифовании стали Р12Ф4К10М3 абразивным инструментом:

1 — 63С СМ1 8 К12В; *2* — 63С25 СМ1 8 К3; *3* — 44А25 СМ1 8 К5; *4* — 44А16 СМ2 8 К5; *5* — 44А16 СМ2 8 К5; *6* — 25А25 СМ2 10 К5

Таблица 2.78

Показатели процесса шлифования

Характеристика круга	Ст	*n*	Ск	*m*
63С 25 СМ1 8 К12 В	2,10	0,95	0,36	0,96
63С 25 СМ1 8 К3	0,70	1,40	0,22	0,28
44А 25 СМ1 8 К5	0,58	1,28	0,28	0,38
44А 16 СМ1 8 К5*	0,40	1,05	–	–
44А 16 СМ2 8 К5	0,35	1,00	–	–
24А 25 СМ2 10 К5	0,26	1,66	0,16	0,20

* — зерно монокорунда после прокалки при 800—1000 °С.

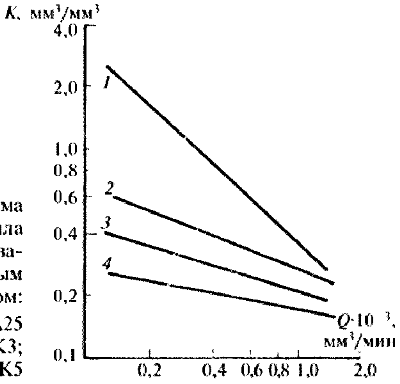


Рис. 2.42. Зависимость удельного съема металла K от скорости съема металла Q при круглом наружном шлифовании стали Р12Ф4К10М3 абразивным инструментом:

1 — 63С25 СМ1 8 К12В; *2* — 44А25 СМ1 8 К5; *3* — 63С25 СМ1 8 К3; *4* — 25А25 СМ2 1К5

в пределах 0,15–0,60. Удельный съем кругами из 63С на связке 12В, а также на борлитиевой связке 45Ш-34 несколько выше, особенно при $Q < 400$ мм³/мин, при более сильном влиянии скорости съема металла ($m = 0{,}95$ против $m = 0{,}2$–$0{,}38$ у обычных абразивных кругов), что свидетельствует о более интенсивном самозатачивании круга.

Анализ T–Q- и K–Q-зависимостей (рис. 2.43), построенных для кругов из 63С одной зернистости структуры на различных связках при равном количестве ее весовых частей, показывает, что стандартные круги на промышленной связке К3 отличаются низкой стойкостью, которая при $Q > 2500$ мм³/мин не превышает 1 мин при весьма низком удельном съеме (не более 0,8 мм³/мин). Круги на новых керамических связках обеспечивают значительно более высокую (до четырех раз) стойкость при существенно более высоком (до трех раз) удельном съеме и меньшей степени влияния скорости съема металла на период стойкости круга и удельный съем ($n = 0{,}63$–$0{,}70$ и $m = 0{,}14$–$0{,}30$ против $n = 0{,}77$ и $m = 0{,}28$–$0{,}34$, табл. 2.79).

Круги на связках 12В и борлитиевой обеспечивают второй класс точности, стабильный радиус головки болта (в пределах 0,5–0,6 мм) и шероховатость шлифованной поверхности, соответствующую шероховатости 1,25 мкм как при предварительном, так и при окончательном шлифовании (табл. 2.80).

Таким образом, установлено, что шлифование труднообрабатываемых быстрорежущих сталей и высокопрочного титанового сплава кругами из 63С на волластонитовой связке 12В и борлитиевой 45Ш-34 обеспечивает наиболее высокий период стойкости при наименьшем влиянии на него скорости съема

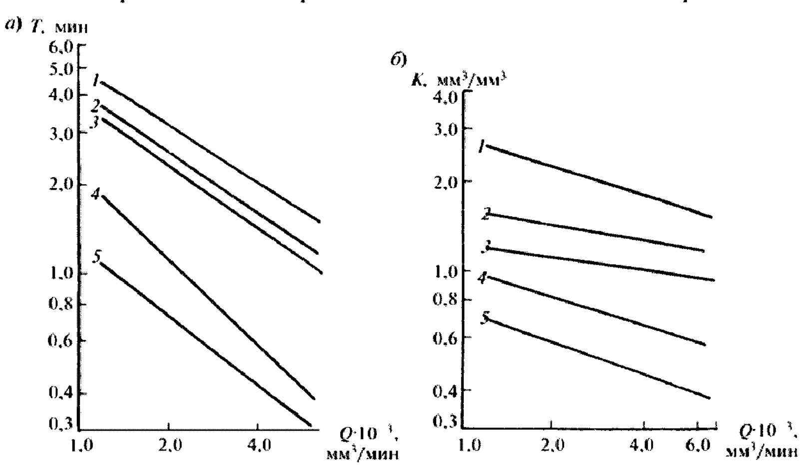


Рис. 2.43. Зависимость стойкости круга (*а*) и удельного съема металла (*б*) от скорости съема металла при бесцентровом врезном шлифовании высокопрочного титанового сплава ВТ16 абразивным инструментом:
1 – 63С16 С1 К12В; *2* – 63С16 С1 борлитиевая; *3* – 63С16 СМ2 К12В;
4 – 63С16 СМ2 К3; *5* – 63С16 СМ1 К3

Таблица 2.79

Показатели процесса шлифования

Характеристика круга	Ст	n	Ск	m
63С 16 С1 К12 В	5,10	0,63	2,75	0,30
63С 16 С1 К70 Ш-10	4,30	0,69	1,62	0,17
63С 16 СМ2 К12 В	3,90	0,70	1,24	0,14
63С 16 СМ2 К3	2,20	0,95	1,00	0,28
63С 16 СМ1 К3	1,27	0,77	0,74	0,34

Таблица 2.80

Показатели процесса шлифования

Характеристика круга	$S_{поп}$, м/мин	R_z, мкм	Параметр шероховатости R_a, мкм
63С 16 СМ2 К3	2	3,4	1,25
	4	5,4	1,25
63С 16 С1 К12 В	2	2,8	0,63
	4	4,0	1,25
63С 16 С1 К70 Ш-10	2	3,2	0,63
	4	4,0	1,25

металла (n = 0,95 и n = 0,63–0,70 соответственно) и наиболее высокий удельный съем при наименьшем на него влиянии скорости съема металла (m = 0,14–0,30) при обработке титанового сплава ($Q \leq 6000$ мм^3/мин) и значительном влиянии степени m (m = 0,95) при обработке быстрорежущих сталей ($Q \leq 2000$ мм^3/мин).

Для изыскания возможности частичной или полной замены зеленого карбида кремния (как более энергоемкого в производстве SiC) черным в работе [114] проведены исследования режущих свойств шлифовальных кругов из смеси зеленого и черного карбида кремния на операции шлифования твердых сплавов.

С этой целью были изготовлены круги 1 250 × 20 × 76 зернистостью 40, твердостью М3 на керамической связке с содержанием черного карбида кремния марки 54С, равным 100, 80, 60, 40, 20, 0 %, и с содержанием зеленого карбида кремния марки 63С, равным 0, 20, 40, 60, 80, 100 % соответственно по рецептуре, применяемой на заводах отрасли.

Сравнительные испытания шлифкругов проводились на плоскошлифовальном станке модели 3711. Обрабатывались образцы размером 127 × 6 × 20 мм из твердых сплавов марок Т15К6 (HRA = 90) и ВК8 (HRA = 87,5). Время опыта 60 мин.

За критерии оценки эффективности процесса шлифования принимались: режущая способность круга $Q_м$, см^3/мин; износ круга Q, см^3/мин; коэффициент шлифования $K^м_{ш}$, г мет./г аб. Качество обработанной поверхности оценивалось по шероховатости R_a и наличию (или отсутствию) шлифовочных дефектов — прижогов, трещин, сколов.

Режим шлифования принимался с таким расчетом, чтобы на обработанных поверхностях образцов не наблюдалось шлифовочных дефектов при шлифовании кругами как из зеленого, так и из черного карбида кремния.

На основании предварительных экспериментов принят следующий режим шлифования:

Скорость круга, м/с.. 20
Продольная скорость стола, м/мин............... 16
Поперечная подача, мм/ход стола.................. 2
Глубина резания, мм.......................................0,03

В качестве СОЖ применяли 3 %-ный водный раствор соды. В результате сравнения работоспособности кругов из карбидокремниевых материалов установлено, что круги как из зеленого, так и из черного карбида кремния, а также из их смеси при шлифовании твердых сплавов работают в режиме интенсивного самозатачивания. За счет интенсивного самозатачивания режущая часть кругов постоянно обновляется, и в процессе работы не требуется их дополнительной правки. Стойкость шлифкругов при этом остается неизменной и практически равна времени работы их до полного (допустимого) износа. С повышением твердости кругов выше М3 на шлифованной поверхности образцов обнаруживаются трещины и сколы, в большей степени на сплаве марки Т15К6 и в меньшей — на сплаве марки ВК8, что свидетельствует о меньшей склонности к трещинообразованию однокарбидных сплавов группы ВК. Шероховатость обработанной поверхности образцов при шлифовании исследуемыми кругами изменяется незначительно и находится в пределах 0,68–0,72 мкм.

Значения эксплуатационных показателей $Q_м$, $Q_в$ и $K_ш$ кругов из зеленого и черного карбида кремния и из их смеси при шлифовании двухкарбидного сплава Т15К6 и однокарбидного сплава ВК8 представлены в табл. 2.81.

Как видно из табл. 2.81, круги из черного карбида кремния при шлифовании твердых сплавов по эксплуатационным показателям уступают кругам из зеленого

Таблица 2.81

Эксплуатационные показатели кругов из карбида кремния

Характеристика шлифкруга	$Q_м$, см^3/мин	$Q_в$, см^3/мин	$K_ш$, г мет./г аб.
54С 40 М3 К (20 % 63С + 80 % 54С)	0,080/0,0041	1,48/1,20	0,30/0,14
40 М3 К (40 % 63С + 60 % 54С)	0,089/0,048	1,32/2,00	0,38/0,18
40 М3 К (60 % 63С + 0 % 54С4)	0,093/0,052	1,25/1,90	0,42/0,20
40 М3 К (80 % 63С + 20 % 54С)	0,095/0,054	1,20/1,88	0,44/0,21
40 М3 К	0,096/0,054	1,19/1,88	0,45/0,21
63С 40 М3 К	0,096/0,055	1,19/1,87	0,4/0,22

Примечание. В числителе приведены данные для сплава Т15 К6, в знаменателе — сплава ВК8.

карбида кремния по режущей способности и износу в 1,2–1,5 раза, по коэффициенту шлифования — в 1,5 раза. С увеличением содержания в круге зеленого карбида кремния его эксплуатационные показатели повышаются, и при соотношении зеленого и черного карбида кремния не менее 60 и не более 40 % соответственно показатели процесса шлифования изменяются незначительно и находятся на одном уровне по сравнению с кругами из зеленого карбида кремния.

2.2.3. Низкотемпературные керамические связки

Впервые вопрос об использовании в качестве связок составов некоторых низкоплавких эвтектик силикатных систем, а также некоторых легкоплавких стекол, содержащих B_2O_3, MgO и ZnO, изложен в работах [115, 116].

Для экспериментов из химически чистых материалов были изготовлены высококремнеземистые, не содержащие Al_2O_3 стекла трех групп:

1) стекла, богатые щелочами (табл. 2.82);

2) борно-магниевые легкоплавкие стекла (5), содержащие до 15 % B_2O_3 и до 7,0 % MnO, плавящиеся при температуре 670–720 °С (связки № 6 и 7);

3) борно-магниевые стекла тех же составов, в которых часть оксида магния (до 2 %) заменена ZnO (связки № 8 и 9).

Указанные стекла огнеупорностью не выше 770 °С измельчались и применялись в качестве связок. На этих связках (с 14 на 100 вес. ч. зерна) были заформованы образцы из белого электрокорунда, которые обжигались затем в различных температурных условиях: от 900 до 1100 °С и при выдержке при конечной температуре от 1 до 8 ч.

Минералогический просмотр обожженных образцов показал, что все связки представляют собой стекла; зерна корунда оплавлены. С повышением температуры и увеличением времени выдержки от 1 до 8 ч в интервале температур 900–1100 °С растворимость корунда в связке увеличивается, при этом в зависимости от составов стекла наблюдается минералообразование плагиоклаза, шпинели, а при наличии в стекле B_2O_3 — алюмината бора.

Прочность и твердость образцов из белого электрокорунда с 14 % связки, полученных в оптимальных условиях, представлены в табл. 2.83.

Авторы делают вывод, что при применении для производства изделий на легкоплавких связках в целях снижения температуры обжига преимущества имеют связки, содержащие в своем составе B_2O_3.

Таблица 2.82

Химический состав первой группы стекол

Номер стекла	Система	Состав эвтектик, %						Огнеупорность
		Na_2O	K_2O	CaO	MgO	BaO	SiO_2	
1	Na_2O–CaO–SiO_2	21,3	–	5,20	–	–	73,5	725
2	Na_2O–K_2O–SiO_2	8,0	23,0	–	–	–	69,0	540
3	Na_2O–BaO–SiO_2	23,0	–	–	–	5,5	71,5	725
4	Na_2O–MgO–SiO_2	32,0	–	–	7,0	–	61,0	710
5	Na_2O–MgO–SiO_2	24,0	–	–	3,0	–	73,0	740

Таблица 2.83

Прочность и твердость образцов

Показатель	I группа связок					II группа связок		III группа связок	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Механическая прочность на разрыв, МПа	8,9	8,1	9,1	7,0	8,8	14,0	15,0	12,1	13,0
Твердость	СМ2	М3	С2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ2	СТ2
Огнеупорность, °С	760	600	770	680	710	690	730	690	690

Применение других легкоплавких связок, стекол (исследованных составов), богатых щелочными оксидами, плавящихся при температуре не выше 740 °С, не обеспечивает получения абразивных изделий с высокими механическими свойствами.

В табл. 2.84 представлен химический состав легкоплавких керамических связок, предлагаемых различными авторами для абразивных изделий из электрокорундовых и карбидкремниевых абразивных материалов, с температурой обжига не более 900—1100 °С.

Однако до настоящего времени в отечественной практике легкоплавкие керамические связки не нашли промышленного применения.

Таблица 2.84

Химический состав легкоплавких керамических связок

Наименование компонентов	Массовая доля, %	Источник информации	Авторы
SiO_2 B_2O_3 Na_2O или K_2O Li_2O CaO, BaO, SrO или MgO	48–50 20–3 22–10 10–4 0,5–18	Патент ФРГ 2345759 В 24Д 3/02, опубл. 12.05.77. Приоритет СССР 25.09.72	Институт сверхтвердых материалов АН Украины
TiO_2, Al_2O_3, Cr_2O_3 или ZrO_2	0,0–5,0		
Литийборосиликатная фритта Огнеупорная глина Полевошпатовый материал Криолит	15,0–60,0 0,1–40,0 15,0–60,0 5,0–15,0	А. с. 517203 (51) М кл[2] В24Д 3/14	Б.А. Брянцев, С.Г. Воронов, З.И. Кремень, Н.В. Куценко, В.Л. Лысанов, З.М. Прозорова, М.З. Равикович, М.Г. Эфрос
Литийборосиликатная фритта Свинцовый сурик Баделеит Пиролюзит	90–96 2,0–5,0 1,6–4,0 0,4–1,0	А. с. 634924 (51) М кл[2] В24Д 3/14 С04 В 35/00, опубл. 30.11.78	Г.Н. Стародубова, М.Г. Эфрос, В.М. Коломазин, А.А. Лисова

Наименование компонентов	Массовая доля, %	Источник информации	Авторы
Силикат циркония	45–54	А. с. 755536 (51) М кл[3] В24Д 3/14, опубл. 15.08.80. Бюл. № 30	В.Д. Бондаренко, А.В. Черных, В.С. Андреещев, Ю.А. Полянин, Е.К. Бондарев, Ф.Г. Рубан
Карбид бора	0,5–10,0		
Оксид железа	0,5–15,0		
Стекло	30–45		
SiO_2	62–70		
Al_2O_3	3–8		
Na_2O	5–10		
Ka_2O	5–10		
BaO	8–15		
Li_2O	0,3–0,9		
Sb_2O_3	0,2–0,6		
F	0,5–15		
Абразив	65–75	А. с. 942975 (51) М кл[1] В24Д 3/14, опубл. 15.078.820. Бюл. № 26	М.И. Кузьменков, В.В. Печковский, Н.М. Кирилова, И.Г. Довгалло
Раствор хлорфосфата магния	12–20		
Вода	Остальное		
Al_2O_3	30–64	А. с. 667393 В24Д 3/34, опубл. 07.12.76	–
Нитрид бора	1–15		
Стекло	35–55		
SiO_2	5,0–55,0		
Al_2O_3	5,5–12,0		
Li_2O	4,5–10,0		
Na_2O	4,0–12,0		
K_2O	2,0–6,0		
BaO	5,0–10,0		
B_2O_3	12,0–20,0		
CaO	15–20	А. с. 859408 С 09 К3/14 (53) 621, опубл. 20.01.77. Бюл. № 2	П.Г. Усов, Е.П. Цымбалюк, В.А. Лотов, В.И. Верещагин
MgO	12–15		
Al_2O_3	3–5		
TiO_2	4–10		
MnO_2 или V_2O_5	0,5–3,0		
SiO_2	Остальное		
Огнеупорная глина	80	А. с. 218699 кл. 67С1 В24Д, опубл. 30.08.68	В.С. Павлов, В.С. Лысанов, М.Г. Эфрос, И.С. Миронюк, В.С. Буров, Л.Д. Шаянова, С.Г. Воронов
Литийборосиликатная фритта	20. Температура обжига 950–1000 °С		
Боросиликатное стекло	30–75	Патент ФРГ 2211443 В24Д 3/14 С04 В 31/16, опубл. 18.12.75	–
Криолит	5–15		
Сподумен	10–60		
Тальк	5–15		
Боросиликатное стекло	40–75	Патент Франции 2173659 С04 В 35/00 11, опубл. 1973 г.	–
Криолит	5–15		
Литийсодержащий материал	20–25		

Наименование компонентов	Массовая доля, %	Источник информации	Авторы
SiO_2 Al_2O_3 Na_2O K_2O B_2O_3	68,5 3,70 2,6 4,4 20,5	Абразивы НИИМАШ. М., 1969. Вып. 4. С. 3–6	С.М. Федотова, Л.И. Мишина, Л.И. Фельдгун
SiO_2 Al_2O_3 B_2O_3 Na_2O K_2O Li_2O	64,50 3,70 20,0 2,40 3,80 4,80	Абразивы НИИМАШ. М., 1969. Вып. 4. С. 3–6	С.М. Федотова, Л.И. Мишина, Л.И. Фельдгун

Причины, сдерживающие внедрение в производство легкоплавких связок, на наш взгляд, таковы:

легкоплавкие связки (стекла) имеют "узкий" интервал спекания, в связи с чем сложно на одной связке получить все степени твердости абразивного инструмента из всех видов абразивных материалов и зернистостей. В связи с этим количество марок связок должно увеличиваться, что приведет к усложнению технологического процесса производства абразивного инструмента. Узкий интервал "спекания" практически не позволяет обжигать абразивный инструмент в туннельных газовых печах, поэтому обжиг инструмента необходимо производить в камерных или туннельных электрических печах;

абразивный инструмент на легкоплавкой связке в большей степени подвержен деформации, и, как показывает опыт, максимальный диаметр изготавливаемых кругов ограничивается диаметром 500 мм включительно;

абразивные смеси на легкоплавких связках обладают низкой пластичностью. Для ее увеличения вводится пластическая огнеупорная глина до 20 %, что значительно изменяет (ухудшает) микроструктуру абразивного черепка, так как для процесса взаимодействия огнеупорных глин со стеклом и гомогенизации всей смеси температуры 1000 °С недостаточно.

Механическая прочность сырых и высушенных образцов на легкоплавких связках очень низкая. На сегодня единственным удовлетворительным связующим такой формовочной смеси является жидкий бакелит, но он токсичен и требует соблюдения норм по ПДК.

2.2.4. Влияние качества сырьевых материалов на физико-механические свойства абразивного инструмента

Применение перлита и обсидиана в качестве сырья для керамических связок по сравнению с полевым шпатом и пегматитом впервые было опробовано С.Г. Вороновым и Н.П. Згонником в 1965 году.

Для изготовления образцов из электрокорунда белого и нормального применялась связка К5 (51б) состава, % вес. ч.: борное стекло — 30, полевошпатовый материал (полевой шпат, пегматит, перлит или обсидиан) — 40, огнеупор-

ная глина — 30. Для инструмента из карбида кремния использовалась связка К3 состава 70—60 % полевошпатовых материалов и 30—50 % глины. Обжиг образцов производился в электрической печи при температуре 1260 °С и выдержке 2 ч.

Результаты испытаний образцов, представленные в табл. 2.85, показали, что по прочности образцы при одинаковой твердости, изготовленные из нормального электрокорунда на связках с различными полевошпатовыми материалами и вулканическими стеклами, отличаются незначительно (5—10 %). Образцы на связках с полевым шпатом и обсидианом по прочности на 5—10 % выше образцов, изготовленных на связках с пегматитом и перлитом.

Прочность образцов из белого электрокорунда, изготовленных на связке с обсидианом, на 5—7 % выше, чем на связках с приладожским шпатом и перлитом, и на 10 % выше, чем на связке с елисеевским пегматитом.

Замена в связке полевого шпата или пегматита на перлит или обсидиан в равных количествах твердость изделий не изменяет.

В работах [117, 118] приводятся данные по исследованию перлита и обсидиана Арагацкого месторождения в качестве однокомпонентных связок П10 и О10 по сравнению с производственными связками К1 и К5 (51б). Результаты определения механической прочности на изгиб свежезаформованных, высушенных и обожженных образцов на этих связках приведены в табл. 2.86.

Как видно из табл. 2.86, прочность свежезаформованных образцов на перлите в два раза ниже, чем на связках К1 и 51б, однако при их хранении на воздухе она быстро повышается вследствие гидратации перлита и обсидиана. Так, свежезаформованные образцы на связке П10 через 5 мин имели механическую прочность 0,085 МПа, через 10 мин — 0,140 МПа и через 15 мин — 0,202 МПа.

Особенностью технологии изготовления инструмента на связках П10 и О10 является влажность формовочной смеси во избежание прилипания к прессформе — не более 2 %, при этом на нижнюю формовочную плиту укладываются бумажные прокладки. Срок хранения массы 3—4 ч, давление прессования на 7—10 % больше, чем при прессовании на многокомпонентной связке. Необходимо отметить, что брак изделий при выпуске промышленных партий находился в пределах общезаводского брака и составлял в зависимости от технологической дисциплины и ассортимента изделий 2,80—15,8 %.

Авторы [119] отмечают, что применение "сырого" перлита в качестве связки для изготовления крупногабаритных и твердых кругов является одной из причин, приводящих к значительному браку, так как при обжиге такие изделия вспучивались, растрескивались, образовывались трещины, причиной которых являлось удаление воды из "сырого" перлита.

Авторы предложили использовать дегидратированный перлит (температура дегидратации 950—1000 °С, продолжительность соответственно 60 и 15 мин). Установлено также, что при хранении дегидратированного перлита в воздушно-влажных условиях (относительная влажность воздуха B = 95 %, температура среды T = 20 °С) молотый перлит приобретает в течение 45 дней до 11,7 % воды. Оптимальным сроком хранения является 1,5 мес, приобретенная после дегидратации вода до 5 % не влияет на брак изделия (см. табл. 2.86, связка ПД).

Результаты испытаний показывают, что абразивные изделия, изготовленные на связке из дегидратированного перлита, обладают несколько повышенной

Таблица 2.85

Физико-механические свойства образцов на связках с различным полевошпатовым материалом

Наименование опытной связки*	Количество связки на 100 вес. ч. шлифзерна							
	7				17			
	Твердость по пескоструйному прибору		Механическая прочность, МПа		Твердость по пескоструйному прибору		Механическая прочность, МПа	
	Глубина лунки, мм	По ГОСТ	на изгиб	на разрыв	Глубина лунки, мм	По ГОСТ	на изгиб	на разрыв
Образцы из электрокорунда нормального марки 14А 40								
Связка 1	4,56	СМ2	24,4	11,2	1,82	Т1	36,8	16,1
Связка 2	4,57	СМ2	22,8	10,2	1,77	Т1	34,2	15,5
Связка 3	4,66	СМ2	22,1	9,3	1,86	Т1	35,8	15,5
Связка 4	4,64	СМ2	25,3	10,5	1,64	Т2	37,0	16,6
Образцы из электрокорунда белого марки 24А 40								
Связка 1	5,59	СМ1–М3	33,8	15,5	2,19	СТ2–СТ3	39,4	17,0
Связка 2	5,16	СМ1	33,2	15,2	2,38	СТ2	37,1	16,0
Связка 3	5,48	СМ1	33,1	15,0	2,15	СТ3	38,6	17,5
Связка 4	4,86	СМ2	33,8	16,5	2,16	СТ3	39,8	17,7
Образцы из карбида кремния зеленого марки 63С 40								
Связка 1	–	М3	–	5,8	–	СМ2	–	6,0
Связка 2	–	М3	–	4,1	–	СМ1	–	5,0
Связка 3	–	М3	–	4,3	–	СМ1	–	6,1
Связка 4	–	М3	–	4,8	–	СМ1	–	5,1

* Связка 1 – на полевом шпате; связка 2 – на пегматите; связка 3 – на перлите; связка 4 – на обсидиане.

Таблица 2.86

Прочность образцов на различных связках

Характеристика образцов (испытание)	Предел прочности образцов на связках, МПа				
	К1	К5(51б)	П10	О10	ПД
Свежезаформованные (изгиб)	0,079	0,076	0,038	0,0360	0,065
Высушенные (изгиб)	1,980	0,650	1,300	2,650	1,760
Обожженные (разрыв)	11,50	14,60	14,85	15,100	15,420

Примечание. П10 – однокомпонентная связка на перлите; О10 — однокомпонентная связка на обсидиане; ПД — однокомпонентная связка на дегидратированном перлите.

прочностью и, следовательно, более высокими эксплуатационными свойствами. Кроме того, высокая механическая прочность сырца позволяет увеличить габариты изготовляемого абразивного инструмента.

В табл. 2.87 приведены результаты определения прочности образцов различной твердости, изготовленных на основе дегидратированного перлита из электрокорунда марки 25А40 по рецептуре, % вес. ч.: зерно — 100, связка — 9,4, жидкий силикат — 4,1, декстрин — 1, объемный вес сырца 2,26 г/см^3. Из табл. 2.87 видно, что с ростом твердости изделий прочность свежезаформованных образцов на дегидратированном перлите снижается, а высушенных — значительно возрастает.

Для определения эксплуатационных свойств абразивного инструмента на однокомпонентных связках П10 и О10 по сравнению с производственными связками К1 и К5 (51б) изготавливались круги из белого электрокорунда зернистостью 40, 25 и 16 (твердостью М2–СТ3) диаметром 250–1100 мм и высотой 20–100 мм. Стойкость инструмента на этих связках на 11–110 % выше (в зависимости от операций шлифования) стойкости кругов, изготовленных на производственных связках.

Эксплуатационные показатели кругов 1 350–400 × 40 × 127 63С40 СМ1 ТК на борсодержащей связке К10 и борсодержащих связках № 1 (на обсидиане) и № 2 (на перлите) оценивали по их стойкости до полного износа.

Испытания проводили на операции заточки резцов (пластин твердого сплава Т5К10, Т15К6, ВК8) на станках марок 3321, 332Б при следующем режиме

Таблица 2.87

Прочность образцов из электрокорунда марки 25А на связке ПД в зависимости от их твердости

Характеристика образцов	Предел прочности образцов, МПа								
	Структура 6					Структура 5			
	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ3	Т1	Т2
Свежезаформованные	0,068	0,065	0,056	0,051	0,044	0,044	0,040	0,038	0,036
Высушенные	1,84	1,76	1,92	2,08	2,16	2,32	3,60	4,08	4,00
Обожженные	14,85	15,42	13,57	15,31	–	16,59	13,46	13,92	12,30

шлифования: скорость круга $v_к$ = 30 м/с; снимаемый припуск t = 0,5–0,6 мм; подача ручная. Установлено, что стойкость опытного и серийного инструментов находится на уровне 360–370 обработанных деталей. Эксплуатационные показатели карбидкремниевого инструмента на опытных и промышленных связках равноценны.

Сравнительные испытания кругов на связке с перлитом и на пегматите — полевом шпате проводились в производственных условиях заводов-потребителей, при этом круги выбирались одной твердости [120].

Для определения эксплуатационных свойств абразивного инструмента на связке, содержащей перлит, были изготовлены следующие партии шлифкругов:

из зерна электрокорунда нормального: 1 600 × 63 × 305 14А40 СТ1 К5, 1 500 × 150 × 305 14А40 С2 К5, 1 350 × 4 × 127 14А40 С2 К5 и 1 600 × 50 × 125 14А25 С2 К7;

из карбида кремния зеленого: 1 250 × 25 × 75 63С25 СМ2 К7, 1 250 × 25 × 32 63С10 СМ1 К7, 1 250 × 25 × 32 63С8 СМ1 К8 и 1 350 × 8 × 160 63С5 СМ1–СМ2 К9.

Испытания проводили на операциях круглого наружного, плоского, бесцентрового и сложнопрофильного шлифования различных деталей из сталей Х9С2, 12ХН3А, 4Х9С2, 40Х, Р18, твердого сплава ВК8 и др. Детали, согласно действующей на заводе-потребителе технологии, проходили термообработку до заданной твердости.

Эксплуатационные показатели этой группы кругов представлены в табл. 2.88.

Результаты испытаний показывают, что круги на связке, содержащей перлит, работают аналогично кругам на полевом шпате, а по сравнению с кругами на пегматите обладают повышенной до 1,5 раза стойкостью между правками и в 1,2–1,8 раза повышенной стойкостью до полного износа. Таким образом, применение в связках пегматита приводит к ухудшению эксплуатационных свойств инструмента, а перлит является полноценным заменителем полевого шпата.

Изучение влияния различных полевых шпатов и их заменителей на свойства абразивного черепка из карбида кремния проводилось авторами [121, 122] в целях выяснения возможности их использования и взаимозаменяемости.

В табл. 2.89 представлены химический состав сырья и его огнеупорность. Как видно из таблицы, содержание щелочей в полевых шпатах изменяется от 14,62 до 10 %, калиевый модуль — от 5,80 до 0,52, огнеупорность — от 1280 до 1160 °С, содержание кварца колеблется в пределах 8–10 %. В пегматите Читинского месторождения кварца содержится 25 %.

В табл. 2.90 приводятся химический состав и огнеупорность связки К10, содержащей различное полевошпатовое сырье или его заменители (перлит, обсидиан).

Данные табл. 2.90 показывают, что огнеупорность связок изменяется от 1300 до 1160 °С; максимальная огнеупорность наблюдается на связке К10, изготовленной на пегматите, перлите, обсидиане, минимальная огнеупорность — на полевошпатовых концентратах с содержанием суммы щелочей примерно 12 % при отношении K_2O/Na_2O = 0,50–2,00, т. е. на "натриевых" концентратах.

Таблица 2.88

Эксплуатационные показатели кругов

Типоразмер и характеристика круга	Операция	Станок	Режимы шлифования	Инструмент для правки	Охлаждающая жидкость	Стойкость между правками, шт./дет.	Стойкость до полного износа, шт./дет.	Удельная производительность	Параметр шероховатости R_a, мкм
1 600 × 63 × 305 14А 40 СТ К5 на перлите/на пегматите	Круглое наружное шлифование рычага передней подвески автомобиля. Материал — сталь 35Х (НВ 255–302)	Круглошлифовальный станок 3161Т	t = 0,2 мм. $S_{пр}$ = 0,87 мм/об. $П_д$ = 164 об/мин	Алмазный карандаш С3	Обильная, раствором эмульсола	8,45/7,21	52/43	4657/ 3810	1,25–0,63
1 600 × 50 × 305 14А 25 С2 К7 на перлите/на пегматите	Круглое наружное шлифование шеек вала сцепления. Материал — сталь 40Х (HRC 43–52)	То же	t = 0,03 мм. $S_{поп}$ = 0,03 мм/об. $П_д$ = 240 об/мин	Алмазный карандаш ЦС	Обильная, раствором эмульсола	3,65/2,75	50/30	2191/ 1712	1,25–0,63
1 500 × 40 × 127 14А 40 С2 К5 на перлите/ на пегматите	Плоское шлифование торца клапана. Материал – сталь 4Х9С2 (HRC 30–35)	Плоскошлифовальный станок 372Б	t = 0,13 мм. $S_{поп}$ = 0,13 мм/дв.ход. $V_{ст}$ = 10 м/мин. Z = 20 (число проходов)	Алмазный карандаш С3	Обильная, раствором эмульсола	3,79/2,96	137/127	7200/ 5590	1,25–1,25
1 600 × 150 × 305 14А 40 С2 К5 на перлите/на пегматите	Бесцентровое шлифование:								
	клапанов (материал – сталь Х9С2 (HRC 24–34))	Бесцентрово-шлифовальный станок 3184	t = 0,003–0,005 мм. $П_д$ = 22 об/мин	Алмазный карандаш С3	Без охлаждения	3,42/2,50	120/100	12667/ 8148	0,63/0,63
	пальцев (материал – сталь 12ХН3А с цементацией (HRC 56–62))	Бесцентрово-шлифовальный станок 3180	t = 0,06–0,075 мм. $П_д$ = 40 об/мин	"	То же	–	–	4000/ 2200	1,25/1,25
	толкателей (материал – сталь 15 с цементацией (HRC 56–62))	То же	t = 0,06–0,075 мм. $П_д$ = 40 об/мин $V_{ст}$ = 10 м/мин	"	"	–	–	5731/ 3337	1,25/1,25

Окончание табл. 2.88

Типоразмер и характеристика круга	Операция	Станок	Режимы шлифования	Инструмент для правки	Охлаждающая жидкость	Стойкость между правками, шт./дет.	Стойкость до полного износа, шт./дет.	Удельная производительность	Параметр шероховатости R_a, мкм
1 350 × 8 × 160 К35 СМ1 К9 на перлите/на пегматите	Резьбошлифование сложного профиля разношаговых конических шарошек. Материал — сталь 9ХС (HRC 58–62)	Резьбошлифовальный станок мод TYQ-FS-20 (фирма Lindner)	Пд = 1 об/мин. $S_{поп}$ = 0,1 мм/дв.ход	Алмазный карандаш Н4	Обильное, раствором эмульсола	–	Пять правок на одну деталь	–	0,32
1 250 × 25 × 75 63С 25 СМ2 К7	Плоское шлифование пластинок. Материал – твердый сплав ВК8 (HRC 88)	Плоскошлифовальный станок 3Г71	t = 0,1 мм. S = = 0,1 мм/дв.ход. $V_{ст}$ = 20 м/мин	Алмазный карандаш С1	Без охлаждения				
на перлите						0,90	–	–	1,25
на пегматите						0,67	–	–	1,25
на полевом шпате						0,96	–	–	1,25
1 250 × 25 × 75 63С СМ2 К7	Сложнопрофильное шлифование протяжки. Нарезка по целому. Материал – сталь Р18 (HRC 63–65)	Шлицешлифовальный станок МСЗ-345А	$V_д$ = 16 мм/мин. $S_{пр}$ = 16 м/мин. $S_{пол}$ = 0,02 мм/дв.ход	Специальный сложнопрофилированный ролик из стали 9ХС (HRC 58–62)	Раствор эмульсола				
на перлите						–	Две правки на одну деталь	16	1,25
на пегматите						–	Три правки на одну деталь	10	1,25
на полевом шпате						–	Две правки на одну деталь	17	1,25

Таблица 2.89

Химический состав сырья и его огнеупорность

Сырье	Состав сырья, мас. %												Огнеупорность, °C
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	B_2O_3	п.п.п.	K_2O/Na_2O	Сумма щелочей	
Полевошпатовый концентрат Дубровинского месторождения	66,50	17,65	Следы	0,14	0,22	–	12,30	2,10	–	1,09	5,80	14,40	1280
Полевой шпат Белогорского месторождения	64,80	19,66	–	0,06	0,08	0,24	11,12	3,50	–	0,54	3,18	14,62	1280
Полевой шпат Мамского месторождения	69,70	18,58	–	0,13	0,17	–	8,15	2,81	–	0,46	2,90	10,96	1300
Полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения	67,65	20,30	–	0,50	1,14	0,02	6,75	3,25	–	0,39	2,08	10,00	1180
Полевошпатовый концентрат Вышневогорского месторождения	65,65	19,36	0,01	0,13	0,05	0,17	5,20	7,30	–	1,13	0,71	11,50	1200
Натриево-полевошпатовый концентрат Белогорского месторождения	69,00	17,73	–	0,07	0,45	–	4,20	8,06	–	0,49	0,52	12,26	1160
Пегматит Читинского месторождения	77,02	13,50	0,01	0,32	0,39	0,10	3,50	4,60	–	0,56	0,76	8,10	1300
Перлит Арагацкого месторождения	76,98	12,90	–	0,78	0,66	0,08	2,35	3,43	–	2,82	0,69	5,78	1300
Обсидиан Артенинского месторождения	75,40	12,64	0,28	0,59	0,61	0,24	5,18	4,38	–	0,68	1,18	9,56	1280
Борное стекло Маловишерского завода	71,05	3,92	–	0,04	0,63	0,38	4,06	3,81	16,11	–	–	7,87	–
Глина огнеупорная Латненского месторождения	49,45	33,23	2,07	1,21	0,67	0,18	0,25	0,60	–	12,34	–	0,85	1710–1750

Таблица 2.90

Химический состав и огнеупорность связки К10

Связка К10, содержащая различное полевошпатовое сырье	Состав связки, мас. %									п.п.п.	Огнеупорность, °С
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	B_2O_3		
Полевошпатовый концентрат Дубровинского месторождения	63,14	18,80	0,52	0,39	0,41	0,12	7,63	2,06	3,22	3,71	1270
Полевой шпат Белогорского месторождения	62,21	19,90	0,52	0,34	0,33	0,25	6,99	2,83	3,22	3,41	1280
Полевой шпат Мамского месторождения	64,90	19,31	0,52	0,38	0,38	0,12	5,35	2,46	3,22	3,36	1290
Полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения	63,78	20,25	0,52	0,58	0,92	0,13	4,58	2,70	3,22	3,32	1180
Полевошпатовый концентрат Вышневогорского месторождения	62,68	19,74	0,53	0,38	0,87	0,21	3,73	4,92	3,22	3,72	1200
Натриево-полевошпатовый концентрат Белогорского месторождения	61,44	17,91	0,45	0,32	0,47	0,11	7,79	5,08	3,22	3,21	1250
Пегматит Читинского месторождения	68,93	16,51	0,53	0,49	0,50	0,17	2,79	3,44	3,22	3,42	1320
Перлит Арагацкого месторождения	68,91	16,18	0,52	0,74	0,65	0,16	2,16	2,80	3,22	4,66	1300
Обсидиан Артениинского месторождения	68,04	16,04	0,67	0,63	0,63	0,25	3,72	3,32	3,22	3,48	1290

В табл. 2.91 приведены значения механической прочности сырца и высушенных образцов из карбида кремния, изготовленного на связке К10 с введением в нее различного полевошпатового сырья.

Как видно из данных табл. 2.91, прочность сырца и высушенных образцов, изготовленных с применением полевых шпатов Белогорского, Мамского и Караоткельского месторождений, пегматита Читинского месторождения

Таблица 2.91

Механическая прочность образцов из карбида кремния на связке К10

Опытная связка К10, содержащая полевошпатовое сырье	Механическая прочность $\sigma_{изг}$, МПа			
	сырца		высушенных образцов	
Полевой шпат Белогорского месторождения	0,033*	0,060**	0,762*	0,962**
Полевой шпат Мамского месторождения	0,036*	0,052**	0,622*	0,652**
Полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения	0,034*	0,054**	0,618*	0,642**
Пегматит Читинского месторождения	0,031*	0,049**	0,610*	0,621**
Перлит Арагацкого месторождения	0,028*	0,052**	0,633*	0,640**
Обсидиан Артенинского месторождения	0,040	0,051**	0,700*	0,740**

* — на 40 %-ном растворе декстрина.

** — на 50 %-ном растворе декстрина.

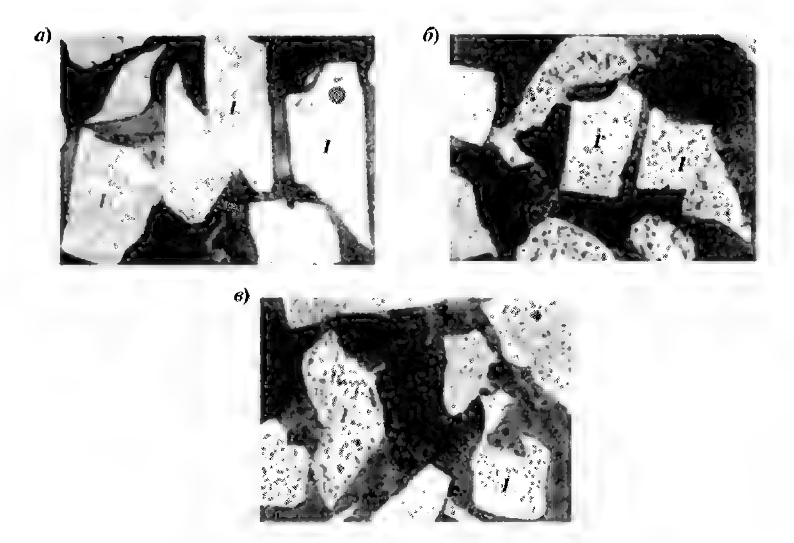


Рис. 2.44. Микроструктура черепка из карбида кремния зернистостью 40, изготовленного на связках К10 (*а*) (на полевом шпате), К10_1 (*б*) (на обсидиане), К10_2 (*в*) (на перлите):

1 — зерно; *2* — связка; *3* — поры

и обсидиана Артенинского месторождения, практически одинакова; несколько занижена прочность сырца, изготовленного с применением перлита Арагацкого месторождения.

Микроскопический анализ образцов из карбида кремния зернистостью 40 на связке К10 с содержанием последней 20 вес. ч., изготовленной на различном сырье, характеризуется равномерной микроструктурой; связка хорошо обволакивает зерна карбида кремния, граница между зерном и связкой четкая, новообразований при 400-кратном увеличении не обнаруживается. На рис. 2.44 представлена микроструктура черепка карбида кремния на связке К10 на различном полевошпатовом сырье [122].

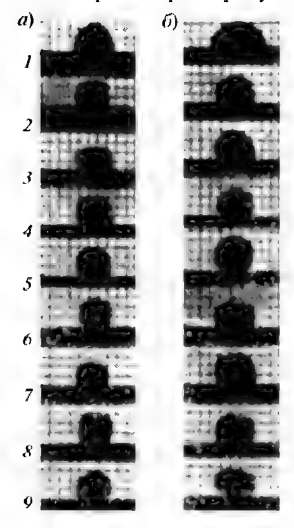


Рис. 2.45. Растекаемость различных полевых шпатов и их заменителей (*а*), а также связки К10 на их основе (*б*) после термообработки при 1250 °С в течение 2 ч:

1 — полевошпатовый концентрат Вышневогорского месторождения; *2* — полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения; *3* — полевой шпат Белогорского месторождения; *4* — полевой шпат Мамского месторождения; *5* — полевошпатовый концентрат Дубровского месторождения; *6* — натриево-полевошпатовый концентрат Белогорского месторождения; *7* — перлит Арагацкого месторождения; *8* — обсидиан Артенинского месторождения; *9* — пегматит Читинского месторождения

Однако по вязкости и по способности растекаться в черепке, заполняя промежутки между зернами карбида кремния, связки на основе полевых шпатов с различными калиевыми модулями несколько отличаются друг от друга. По уменьшению способности к растеканию в черепке их можно расположить в следующий ряд: связки на основе полевошпатового концентрата Вышневогорского месторождения → полевошпатового концентрата Караоткельского месторождения → натриево-полевошпатового концентрата Белогорского месторождения → полевых шпатов Мамского, Дубровского и Белогорского месторождений (рис. 2.45). В образцах, изготовленных с применением пегматита, связка не полностью обволакивает зерна карбида кремния, неплотно сцепляется с ним, не имеет равномерной микроструктуры и содержит значительное количество пор неправильной формы.

Механическая прочность обожженных образцов на разрыв и изгиб, изготовленных на опытных связках, содержащих полевошпатовое сырье с калиевым модулем в пределах 2—4 (полевые шпаты Белогорского и Мамского месторождений, полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения), практически одинаковы. Образцы, изготовленные на связке К10 с введенным в нее полевошпатовым концентратом Вышневогорского месторождения, являющимся натриевым полевым шпатом, имеют прочность на разрыв и изгиб несколько больше по сравнению с первыми. Однако введение такой связки в абразивный черепок из карбида кремния в количестве более 25 % ведет к зауглероживанию образцов, что можно объяснить большей подвижностью расплава, обогащенного оксидом натрия. Введение в связку К10 натриево-

полевошпатового концентрата Белогорского месторождения с калиевым модулем 0,52 ведет к зауглероживанию образцов уже при введении 20 вес. ч. связки.

Образцы, изготовленные на связке К10 с применением пегматита, имеют пониженную твердость и прочность на разрыв и изгиб по сравнению с образцами, приготовленными на всех предыдущих опытных связках. Прочность на разрыв и изгиб и твердость образцов, изготовленных на связке К10 с применением перлита, предварительно прокаленного при температуре 950 °С в течение 4 ч, и обсидиана, имеют такую же прочность, что и образцы, изготовленные на полевошпатовом сырье с калиевым модулем 2–4 (табл. 2.92). Применение непрокаленного перлита ведет к зауглероживанию и некоторому вспучиванию образцов, особенно при твердости СТ2–СТ3. На рис. 2.46 представлены изменения предела прочности на разрыв образцов карбида кремния зеленого различной зернистости на связке К10 в зависимости от вида сырья.

В результате исследования физико-механических свойств и микроструктуры образцов из карбида кремния, изготовленных с применением различного полевошпатового сырья и его заменителей в составе керамической связки, установлено:

возможность использования и взаимозаменяемости различных по химическому составу полевых шпатов с содержанием $K_2O + Na_2O$ от 10,0 до 15,0 % и калиевым модулем 2–6;

возможность применения вулканических стекол — обсидиана и перлита — с обязательной предварительной прокалкой последнего при температуре 950 °С в течение 4 ч;

нежелательность применения полевых шпатов с модулем ниже единицы (натриевых) во избежание зауглероженности абразивного инструмента из карбида кремния;

нежелательность применения пегматитов в составе связки в связи со снижением физико-механических свойств обожженного черепка.

В работе [123] приводятся результаты сравнительных испытаний различных видов керамического сырья в составе абразивной смеси из электрокорунда нормального. Впервые были исследованы перспективные виды сырья для производства керамических связок: микроклиновые концентраты Адуйского месторождения (Свердловская область), кусковой полевой шпат из слюдоносных пегматитовых жил Мамско-Чуйского месторождения (Иркутская область), огнеупорная глина Ново-Райского месторождения (Украина), а также каолины мокрого обогащения Глуховецкого и Просяновского месторождений (Украина). На всех перечисленных месторождениях (кроме Адуйского) имеются горнорудные предприятия, которые могут обеспечить промышленную поставку сырья для абразивной промышленности.

Химический состав сырья для изготовления керамических связок, используемых в инструменте из электрокорунда нормального, приводится в табл. 2.93.

Абразивная масса для формования образцов ("восьмерок") приготовлялась по следующему рецепту, вес. ч.: электрокорунд нормальный № 25 — 100, связка — 9,8, жидкое стекло (плотность 1,48–1,50 г/см^3) — 5,9, сухой декстрин — 1,0; объемный вес массы — 2,2 г/см^3.

Химический состав использованного шлифзерна, %: Al_2O_3 95,67, SiO_2 0,64, Fe_2O_3 0,31, TiO_2 2,82, CaO 0,47, MgO 0,28.

Таблица 2.92

Физико-механические свойства обожженных образцов на связке К10

Номер рецепта	Зернистость	Структура	Количество связки на 100 мас. ч. зерна, мас. ч.	Предел прочности на разрыв для различных связок, МПа			Степень твердости по ГОСТ 18118–79 на различных связках		
				К10	$К10_1$	$К10_2$	К10	$К10_1$	$К10_2$
1	50	6	22,5	5,90	6,40	6,34	М3	М3	М3
2	50	6	22,5	6,80	7,05	6,95	СМ2	СМ2	СМ2
3	50	6	29,0	8,80	8,00	7,60	С1	С1	С1
4	40	7	21,0	5,65	5,76	6,50	М3	М3	М3
5	40	7	27,0	7,54	7,70	7,20	С1	С1	С1
6	40	7	30,5	7,87	8,40	8,10	С1	С2	С2
7	25	7	20,0	6,20	8,90	7,90	М2	М2	М2
8	25	7	24,0	9,60	8,10	10,00	С1	С1	С1
9	25	7	28,0	10,30	10,15	10,20	С2	С2	С2
10	16	7	19,0	7,40	10,20	8,40	М3	М3	М2
11	16	7	24,0	10,60	12,10	10,90	С2	С1	С1
12	16	7	27,0	11,94	12,50	12,90	С2	С2	С2

Примечание. К10 — на полевом шпате; $К10_1$ — на обсидиане; $К10_2$ — на перлите.

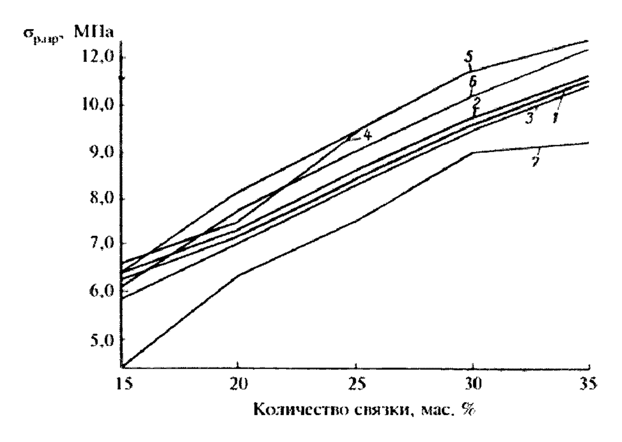


Рис. 2.46. Механическая прочность на разрыв $\sigma_{разр}$ обожженных образцов из карбида кремния зернистостью 40 на связке К10 с использованием полевых шпатов и полевошпатовых концентратов, а также из заменителей различных месторождений:

1 — полевой шпат Белогорского месторождения; *2* — полевой шпат Мамского месторождения; *3* — полевошпатовый концентрат Караоткельского месторождения; *4* — полевошпатовый концентрат Вышневогорского месторождения; *5* — перлит Арагацкого месторождения; *6* — обсидиан Артенинского месторождения; *7* — пегматит Читинского месторождения

Все образцы изготовлялись на борсодержащей связке К5. Шихтовой состав, вес. %: полевой шпат (перлит или обсидиан) — 34, глина огнеупорная или каолин — 32, борное стекло — 30, тальк — 4.

Для исследования были изготовлены две серии образцов. В образцах первой серии переменным фактором являлся полевошпатовый компонент связки. Все остальные компоненты (глина Латненского месторождения, борное стекло производства Маловишерского стекольного завода, тальк Миасского месторождения) оставались постоянными. В образцах второй серии переменным фактором являлся глинистый компонент при следующих постоянных компонентах связки: полевой шпат кусковой Белогорского ГОКа, борное стекло Маловишерского завода, тальк Миасского месторождения.

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов приведены в табл. 2.94.

Как видно из табл. 2.94, огнеупорность связок изменяется незначительно в зависимости от состава полевошпатового компонента. Максимальную огнеупорность (1250—1270 °С) имеют связки, содержащие полевые шпаты с высоким калиевым модулем. Применение полевых шпатов с пониженным калиевым модулем, а также замена полевого шпата перлитом и обсидианом сопровождается снижением огнеупорности связки до 1200—1230 °С.

Таблица 2.93

Химический состав сырья для изготовления керамических связок из электрокорунда нормального

Компонент керамических связок	Химический состав исходных связок, %								п.п.п.	Сумма	Калиевый модуль K_2O/Na_2O	Огнеупорность, °С
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O				
Микроклиновой концентрат Адуйского месторождения												
Проба № 1	66,80	18,74	–	0,06	0,11	0,08	11,12	2,62	0,27	99,80	4,3	1280–1300
Проба № 2	64,50	21,29	–	0,04	0,17	0,02	9,37	4,50	0,21	100,10	2,1	1300
Полевой шпат кусковой Белогорского ГОКа	64,80	19,66	–	0,06	0,08	0,25	11,12	3,50	0,54	100,01	3,2	1280
Концентрат полевошпатовый:												
Вишневогорского месторождения	63,68	21,74	0,53	0,38	0,87	0,21	4,73	6,92	0,72	99,78	0,7	1200
Огневской фабрики № 7 Белогорского ГОКа	75,40	15,11	–	0,04	0,22	0,02	2,00	6,75	0,29	99,83	0,3	1250
Полевой шпат Майского месторождения												
Проба № 1	67,50	18,18	Не определялась	0,11	0,28	0,12	11,50	2,40	0,31	100,40	4,8	1280–1300
Проба № 2	67,20	18,31	То же	0,11	0,31	0,10	11,10	2,50	0,23	99,86	4,4	1270–1280
Проба № 3	67,60	18,12	"	0,13	0,39	0,24	10,50	2,87	0,22	100,07	3,7	1250–1270
Проба № 4	65,80	19,47	"	0,22	0,64	0,10	8,98	4,05	0,42	99,68	2,2	1260–1270
Обсидиан Артенинского месторождения	71,48	13,62	0,42	0,95	0,75	0,25	4,75	3,95	0,62	99,79	1,1	1200–1230
Перлит Арагацкого месторождения	70,91	15,18	0,52	0,74	0,65	0,16	3,16	3,80	4,66	99,78	0,9	1300
Глина огнеупорная:												
Латненского месторождения	46,50	34,15	1,68	0,91	0,59	1,00	0,48	0,74	13,95	100,00	0,6	1740
Ново-Райского месторождения	44,11	36,57	1,27	0,69	0,56	0,72	2,08	1,40	12,61	100,00	1,5	1720
Каолин												
Просяновского месторождения мокрого обогащения:												
1-го сорта	49,87	35,05	0,52	0,38	0,36	0,57	0,70	0,34	14,01	100,00	2,1	1730
2-го сорта	46,20	37,16	0,53	0,74	0,45	0,32	1,00	0,28	13,35	100,00	3,6	1700
Глуховецкого месторождения	46,18	37,44	1,01	0,59	0,28	0,31	0,98	0,35	12,86	100,00	2,8	1730
Тальк Миасского месторождения	55,60	1,24	Не определялся	0,79	0,27	31,65	0,08	0,23	6,75	99,61	Не определялся	Не определялся
Борное стекло* Маловишерского завода	70,05	3,92	То же	0,04	0,63	0,38	4,06	3,81	0,95	99,95	1,1	То же

* Содержит также 16,11 вес. % B_2O_3.

Таблица 2.94

Физико-механические свойства образцов

Компонент керамических связок	Огнеупорность связки, °C	Предел прочности черепка, МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^{-7}$, МПа	Твердость черепка по ГОСТ 18118–72		Прочность, МПа	
		на разрыв $\sigma_р$	на изгиб $\sigma_и$		Глубина лунки, мм	Степень твердости	сырца	высушенного образца
Образцы первой серии								
Полевой шпат:								
Белогорского месторождения	1240–1250	13,8	30,5	48	2,4	М3	0,045	0,8
Вишневогорского месторождения	1230	14,0	28,2	46	3,0	М3	0,030	1,0
Микроклиновый концентрат Адуйского месторождения	1230–1240	14,0	29,0	47	2,5	М3	0,035	1,0
Участок 1	1260	13,3	28,1	4,5	3,1	М3	0,037	1,25
Участок 2	1250	13,6	26,6	4,5	3,1	М3	0,040	0,85
Полевошпатовый концентрат Огневской фабрики № 7 Белогородского ГОКа	1200–1230	12,0	24,2	44	3,1	М3	0,03	0,86
Полевой шпат Мамского месторождения								
Проба № 1	1260–1270	13,0	23,4	45	3,0	М3	0,039	1,15
Проба № 2	1250–1270	12,9	27,7	47	2,7	М3	0,043	0,71
Проба № 3	1250	12,0	30,5	48	2,8	М3	0,039	1,30
Проба № 4	1250	12,6	30,0	49	2,9	М3	0,037	1,03
Обсидиан Артенииского месторождения	1200–1230	12,9	27,0	47	2,4	М3	0,036	0,78
Перлит Арагацкого месторождения	1200–1230	13,2	25,0	47	2,5	М3	0,035	1,0
Образцы второй серии								
Глина огнеупорная:								
Латненского месторождения	1240–1250	13,8	30,5	481	2,4	М3	0,045	0,80
Ново-Райского месторождения	1250	14,0	31,1	50	2,4	М3	0,068	1,10
Каолин:								
Просяновского месторождения мокрого обогащенного:								
1-го сорта	1260	12,4	29,4	47	2,6	М3	0,046	1,0
2-го сорта	1260	13,6	30,5	48	2,7	М3	0,030	0,90
Глуховецкого месторождения	1280	13,1	30,8	48	2,7	М3	0,050	0,81

Данные табл. 2.94 показывают, что состав полевошпатового компонента связки, а также огнеупорных глин и каолинов в опробованных пределах практически не влияет на прочностные свойства черепка из электрокорунда нормального. Однако следует отметить повышенную прочность сырца в случае применения огнеупорной глины Ново-Райского месторождения. Прочность его примерно в 1,5 раза выше прочности образцов на латненской глине или на каолинах Глуховецкого и Просяновского месторождений.

Микроскопическое исследование абразивного черепка показало, что связки, приготовленные из шпатов Белогорского и Мамского месторождений, перлита и обсидиана, характеризуются однородным, хорошо проваренным стеклом бурого или серого цвета с включениями более или менее развитых кристаллов муллита. Показатель преломления стекла колеблется в пределах 1,486—1,507. Во всех образцах связка плотно примыкает к зернам корунда, приконтактных минералообразований не наблюдается. Связки, изготовленные из натриевых полевошпатовых концентратов Вишневогорской и Огневской обогатительных фабрик, более подвижны и реакционноспособны. На контакте зерен корунда со связкой наблюдается прерывистая оторочка из мельчайших кристаллов шпинели (1,5 мкм и мельче). В связках с переменным глинистым компонентом по минеральному составу и структуре существенных различий не обнаружено.

На одном из действующих заводов были проведены промышленные испытания кускового полевого шпата Мамско-Чуйского месторождения и обсидиана Артенинского месторождения.

Испытания шлифкругов диаметром 300—600 мм из электрокорунда нормального на боросодержащей связке, содержащей мамский шпат, на ряде автомобильных, подшипниковых и инструментальных заводах дали положительные результаты.

Круги на обсидиановой связке при обработке сталей 45 и ШХ15 на ряде операций показали резкое снижение стойкости и коэффициента шлифования.

Производственные испытания показали целесообразность организации промышленной добычи и использования в абразивной промышленности полевого шпата из слюдоносных пегматитовых жил Мамско-Чуйского месторождения, а также эффективной замены огнеупорной глины Латненского месторождения огнеупорной глиной Ново-Райского месторождения. Применение каолинов мокрого обогащения исследованных месторождений взамен огнеупорных пластичных глин не ухудшает физико-механических свойств абразивных черепков.

В табл. 2.95 представлены физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого зернистостью 25 на связках типов К8 и К5, изготовленных на различных полевошпатовых материалах, в табл. 2.96 — на связке К5 с применением различного полевошпатового сырья и огнеупорных глин.

Анализ данных таблиц показывает, что исследованное сырье возможно использовать в качестве компонентов керамической связки К5 и К8 за исключением гранита в связках, не содержащих бор (К8), так как это приводит к уменьшению прочностных свойств.

Таблица 2.95

Физико-механические свойства образцов из белого электрокорунда

Наименование сырья	Количество весовых частей связки на 100 вес. ч.	Прочность на разрыв, МПа	Твердость	
			Глубина лунки, мм	По ГОСТ 3751–78
На связке типа К8				
Буронский гранит	7	7,8	5,80	М3
	12	9,3	3,72	С1
	17	10,5	2,60	СТ1–СТ2
Полевой шпат Лянгарского месторождения	7	9,5	5,89	М3
	12	10,9	3,68	С1
	17	12,0	2,52	СТ2
Полевой шпат Приладожского месторождения	7	9,6	6,14	М3
	12	12,0	4,08	С2
	17	12,8	2,62	СТ2
Микроклиновый полевой шпат	7	10,5	5,88	М3
	12	13,6	3,65	С1
	17	14,1	2,56	СТ2
На связке типа К5				
Концентрат караоткельский	7	14,8	6,20	М2
	12	16,5	3,21	С2
	17	16,0	1,79	Т1
Микроклин риколавтавский	7	14,2	6,48	М2
	12	15,9	3,21	С2
	17	15,2	1,75	Т1
Микроклин мамский, жилы № 5, 44, 98, 127, 128	7	15,6	6,29	М2
	12	15,7	3,42	С2
	17	15,7	1,79	Т1
Ортофир Балки Вербовой	7	10,5	6,80	М1
	12	10,9	3,65	С1
	17	13,9	1,65	Т1
Перлит мухорталинский	7	11,6	6,55	М1
	12	11,9	3,69	С1
	17	12,9	1,81	Т1
Липарит	7	10,1	9,49	М2
	12	11,0	3,38	С1
	17	13,5	1,68	Т2
Микроклин белогорский	7	13,1	6,34	М2
	12	14,0	3,12	С2
	17	13,8	1,67	Т2

Таблица 2.96

Физико-механические свойства образцов из 25А25СМ27К5 с применением различного глинистого и полевошпатового сырья

Показатель	Огнеупорная глина Положского месторождения				Каолиновый концентрат Дубровского месторождения с полевым шпатом Мамского месторождения	Огнеупорная глина Ново-Райского месторождения	
	Полевой шпат Мамского месторождения	Полевошпатовый концентрат Чалганского месторождения	Трахит обогащенный Цхис-Убанского месторождения	Полевой шпат Дубровского месторождения		Трахит обогащенный Цхис-Убанского месторождения	Полевой шпат Чалганского месторождения
Огнеупорность, °С	1180	1200	1196–1180	1180	1180	1180	1180–1200
Растекаемость, %	150,0	144,0	150,0	156,0	166,0	150,0	145,0
Механическая прочность сырца, МПа	0,030	0,037	0,035	0,03	0,04	0,05	0,04
Механическая прочность высушенного образца, МПа, при сушке 1 ч	0,680	0,690	0,670	0,700	0,800	0,90	0,80
Предел прочности на изгиб обожженного образца $\sigma_{изг}$, МПа	27,0	33,0	32,0	32,50	34,00	40,00	35,00
Твердость по ГОСТ 18118–79	СМ2	СМ2	СМ2	СМ2	СМ2	СМ2	СМ2
Осыпаемость, %	0,28	0,20	0,43	0,30	0,30	0,10	0,15

2.2.5. Марки связок. Рекомендуемые области их применения

Как следует из результатов исследования по разработке керамических связок для абразивного инструмента, керамические связки представляют собой многокомпонентные смеси, составленные в определенных пропорциях из тонкодисперсных природных и искусственных материалов. В технологии производства абразивного инструмента керамическая связка является основным структурообразующим компонентом, от которого зависят прочностные и шлифующие свойства абразивных кругов. Из одного и того же вида абразивного материала в зависимости от вида связки может быть изготовлен инструмент одних и тех же характеристик с резко отличающимися эксплуатационными показателями.

В отечественной промышленности, в отличие от зарубежной, как правило, керамические связки разрабатывались для изготовления инструмента из определенных видов абразивного материала, специальных типов и размеров инструмента, для получения определенной твердости инструмента и, очень редко, для операции шлифования (например, скоростного).

До 1985 года пять заводов абразивной отрасли выпускали керамические связки для собственного производства, и в том числе товарной для четырех заводов. В табл. 2.97 представлен шихтовой состав связок и области их применения, в табл. 2.98 — химический состав и их огнеупорность.

Многообразие видов связок объяснялось:

ассортиментом выпускаемой продукции согласно специализации;

применением сырьевых материалов различных месторождений, отличающихся химическим составом;

использованием различного оборудования для измельчения и классификации компонентов связок, от которого зависела крупность материалов;

отличием технологического процесса по производству как связок, так и оборудования для изготовления инструмента, и особенно термического оборудования.

Отсутствие на ряде заводов отрасли участков по производству связок ставило их в зависимость от своевременности поставок и принуждало к изготовлению однотипной продукции на связках различных заводов.

С 1986 года выпуск связок осуществляется по ТУ 2-036-984–86 "Связки керамические" (Украина) на сырьевых материалах (табл. 2.99).

Химический состав связок представлен в табл. 2.100.

С 1988 года связки выпускались фирмой "Стандарт" по ТУ 3989-014-05748371–99 "Связки керамические гранулированные" (Россия) на сырьевых материалах (табл. 2.101).

Химический состав связок представлен в табл. 2.102.

В табл. 2.103 представлены шихтовые составы керамических связок и рекомендуемые области их применения. Области применения марок связок устанавливаются техническим регламентом предприятия-изготовителя на соответствующие виды продукции и зависят от рецептуры формовочных смесей и технологии изготовления инструмента.

Сравнение технических условий двух разных производителей показывает:

марки связок, выпускаемые в г. Пологи (Украина) и фирмой "Стандарт" (Россия), обеспечивают выпуск инструмента из всех абразивных материалов и их смесей. При этом зерновой состав связок содержит ≈ 90 % минус 40 мкм;

Таблица 2.97

Шихтовой состав связок и области их применения

Номер завода	Марка связки	Шихтовой состав, мас. %								Область применения
		Полевой шпат, перлит	Нефелин-полево-шпатовый концентрат	Огнеупорная глина, каолин	Боро-сили-катная фритта	Борлитий-силикат-ная фритта	Бариевое стекло	Тальк	Криолит	
1	К1 и К1 "Экстра"	50	–	Легкоплавкая детско-сельская глина 50	–	–	–	–	–	Для инструмента из 25А и 91А зернистостью 50, 16 и 12. Связки с индексом "Экстра" для изготовления мелкозернистого инструмента
	К5 и К5 "Экстра"	30–35	–	30–27	30–35	–	–	10–8	–	
	К8	48–52	–	40–38	–	–	–	12–10	–	Для инструмента из 25А высотой 150–200 мм и специнструмента
	К6	30–28	–	30–28	–	–	30	10–12	–	Для инструмента из хромистого электрокорунда
	К43	40	–	20	–	30		–	10	Для скоростного инструмента (60–80 м/с) из 25А и 91А; индекс "Л" для мелкозернистого инструмента 12 и мельче
	К43Л	30–20	–	20	–	40–50		–	10	
2	К71	34	–	32–34	30	–	–	4–6	–	Для инструмента из 14А
	К5	25–30	–	35–30	30	–	–	10–8	–	Для инструмента из 25А (товарная)
	К3, К3Т	70–71	–	30–29	–	–	–	–	–	Для крупнозернистого инструмента из карбида кремния, индекс "Т" – для мелкозернистого
	К10, К10Т	55	–	25	20	–	–	–	–	
	К3ФП	55	–	30	15	–	–	–	–	Для фасонного инструмента из карбида кремния

Окончание табл. 2.97

3	К11	–	40	30	30	–	–	–	–	Для инструмента из 14А, 25А и легированных электрокорундов
	К12	–	56	34	–	–	–	10	–	
	К13	–	40	40	20	–	–	–	–	
	К14	–	44	31	15	–	–	–	$CaCO_3$ 10	
	К15	–	51	39	–	–	–	–	Бентонит 10	
	676	–	35	35	25	–	–	–	–	
	К9	40	–	40	20	–	–	–	–	
4	К34 (К5)	43	–	30	20	–	–	7	–	Для инструмента из электрокорундовых материалов
	К35	49	–	30	15	–	–	6	–	
	К37 (К8), К38	58	–	30	–	–	–	12	–	Для инструмента из электрокорундовых материалов высотой 150–200 мм и твердых кругов
	К4	51	–	34	15	–	–	–	–	
	К5	48	–	30	15	–	–	7	–	Для скоростного инструмента из электрокорунда белого (60 м/с)
	К10	55	–	25	20	–	–	–	–	Для инструмента из карбида кремния
	К33	70	–	30	–	–	–	–	–	
5	1А	60	–	Ангренская глина 40	–	–	–	–	–	Для инструмента из карбида кремния
	2А	57	–	38	–	–	–	5	–	

Таблица 2.98

Химический состав связок и их огнеупорность

Завод	Марка связки	Состав связок, мас. %												п.п.п., не более	Огнеупорность, °С
		SiO_2	Fe_2O_3, не более	Al_2O_3	CaO	TiO_2, не более	MgO	BaO, не менее	B_2O_3	Li_2O	K_2O	Na_2O	F, не более		
№ 1	К1 и К1 "Экстра"	61,0–66,0	5,0	14,0–20,0	1,0	1,0	3,0	–	–	–	8,0–10,0	8,0–10,0	–	5,0	1140–1200
	К5 и К5 "Экстра"	58,0–63,0	1,0	14,0–18,0	1,0	1,0	2,2–4,0	–	5,0–7,0	–	4,0–7,0	1,8–3,5	–	5,0	1140–1160
	К8	55,0–60,0	1,0	20,0–25,0	1,0	1,0	5,0	–	–	–	4,8–5,5	4,8–5,5	–	7,0	1250–1280
	К6	60,0–65,0	1,0	16,0–20,0	1,0	1,0	2,0	–	–	–	12,0–15,0	12,0–15,0	–	6,5	1200–1230
	К43	54,0–60,0	1,0	15,0–19,0	1,0	1,0	1,0	–	4,8–5,2	1,0–2,0	3,5–7,0	4,4–5,7	5,5	4,0	900–950
	К43Л	54,0–60,0	1,0	15,0–19,0	1,0	1,0	1,0	–	4,8–5,2	1,0–2,0	3,5–7,0	4,4–5,7	5,5	4,0	800–950
№ 2	К71	58,0–64,0	1,0	17,0–21,0	1,0	1,0	1,0–3,0	–	4,0–6,0	–	3,5–6,0	1,5–3,0	–	7,0	1200–1250
	К5	58,0–61,0	1,0	14,0–18,0	1,0	1,0	2,2–4,0	–	5,0–7,0	–	4,0–7,0	1,8–3,5	–	5,0	1120–1160
	К3, К3Т	59,0–63,0	1,0	21,0–25,0	1,0	1,0	до 1,0	–	–	–	6,0–9,5	1,4–3,0	–	5,0	1400–1450
	К10, К10Т	58,0–63,0	1,0	15,0–24,0	1,0	1,0	до 1,3	–	–	–	5,0–9,0	1,7–3,2	–	5,0	1250–1280
	К3ФП	58,0–64,0	1,0	20,0–24,0	1,0	1,0	до 1,0	–	2,0–3,0	–	5,0–7,5	1,5–2,5	–	5,0	1390–1410

Окончание табл. 2.98

№ 3	К11	58,0–62,0	1,0	19,0–22,0	1,0	1,0	2,0	–	4,0–6,0	–	6,0–8,0	6,0–8,0	–	6,0	1160–1200
	К12	53,0–59,0	1,0	22,0–25,0	3,0	1,0	4,0	–	–	–	6,0–8,0	6,0–8,0	–	6,0	1200–1250
	К13	58,0–62,0	1,0	20,0–23,0	1,0	1,0	2,0	–	3,0–6,0	–	6,0–8,0	6,0–8,0	–	6,0	1260–1320
	К14	53,0–57,0	1,0	22,0–23,0	5,0–7,0	1,0	1,0	–	3,0–6,0	–	1,0	5,0–7,0	–	8,0	1180–1200
	К15	56,0–62,0	1,0	20,0–26,0	1,0	1,0	1,0	–	–	–	2,9–3,2	3,8–4,1	–	8,0	1380–1400
№ 4	К34	58,0–64,0	1,5	17,0–22,0	1,0	–	2,0	–	3,0–5,0	–	5,0–8,5	5,0–8,5	–	7,0	1230
	К35	58,0–60,0	1,0	21,5–24,5	1,0	1,0	2,0–2,3	–	2,0–2,5	–	8,2–8,7	8,2–8,7	–	5,0	1245
	К38	55,0–65,0	1,0	–	1,5		2,5–3,5	–	–	–	5,0–10,0	5,0–10,0	–	7,0	1250–1280
	К4	58,0–61,0	1,5	17,0–22,0	1,0	1,0	2,0	–	3,0–5,0	–	5,0–8,5	5,0–8,5	–	7,0	1250–1300
	К5	58,0–62,2	1,5	15,2–19,0	1,0		2,3–6,0	–	5,0–7,0	–	5,0–8,0	5,0–8,0	–	6,0	1150–1200
	К10	58,0–63,0	1,0	15,0–24,0	1,0	1,0	До 1,0	–	3,0–5,0	–	5,0–9,0	1,7–3,2	–	5,0	1250–1280
	К33	55,0–65,0	1,0	20,0–32,0	1,0	1,0	1,0	–	–	–	6,0–9,5	1,4–3,0	–	5,0	1400–1450
№ 5	1А	65–70	1,8	17–20	1,8	1,5	0,4	–	–	–	4,0–4,8	4,0–4,8	–	7,0	1350
	2А	62–68	1,5	14–17	1,5	2,0	0,8	–	–	–	4,5–5,0	4,5–5,0	–	5,0	1260

Таблица 2.99

Сырьевые материалы для изготовления керамических связок по ТУ 2-039-984–86

Марка связки	Наименование сырьевого материала	Нормативно-техническая документация
К3ПГ	Глина огнеупорная марок ПЛГ-1, ПЛГ-1А	ТУ У 322-7-00190503-121–96
К3ФППГ		
К5ПГ		
К7ПГ	Шпат полевой марок ПШК 0,20-2, ПШК 0,20-3, ПШМ-0,20-2, ПШМ-0,20-3	ГОСТ 7030–75, ГОСТ 23034–78 ТУ 21-25-97–77, ТУ 21-25-158–75
К8ПГ		
К9ПГ	Фритта боросиликатная	ТУ 11-77 040.735.069 ТУ 21-13541565-59–94
К10ПГ		
К15ПГ	Тальк молотый марки ТМК-28 или др.	ГОСТ 19729–74 ГОСТ 21234–75
К20ПГ		
К71ПГ		
К3ПГЕ	Глина огнеупорная марок ПЛГ-1, ПЛГ-1А	ТУ У 322-7-00190503-121–96
К10ПГЕ	Пегматит Елисеевского месторождения	НД утвержденная в установленном порядке
К15ПКЕ	Фритта боросиликатная	ТУ 11-77-040.735.069 ТУ 21-13541565-59–94
К20ПГЕ	Тальк молотый марки ТМК-28 илн др.	ГОСТ 19729–74 ГОСТ 21234–75
К71ПГЕ		
К3М	Глина огнеупорная марки ДНО	НД утвержденная в установленном порядке
К5М	Каолин обогащенный марок КФ-2, КФ-3	ГОСТ 21286–82
К8М	Каолин вторичный марки ПЛК-В	ТУ У 322-7-00190503-056–96
К9М	Шпат полевой марок ПШК 0,20-2, ПШК 0,20-2, ПШМ 0,20-2, ПШМ 0,20-3	ГОСТ 7030–75, ГОСТ 23034–78, ТУ 21-25-97–77
К10М	Фритта боросиликатная	ТУ 11-77040.735.069 ТУ 21-13541565-59–94
К15М	Тальк молотый марки ТМК-28 или др.	ГОСТ 19729–74 ГОСТ 21234–75
К20М		
К71М		

при изготовлении связок в обоих случаях используется качественное сырье, применение которого было широко исследовано при разработке составов связок, за исключением связок на елисеевском пегматите. Этот вид сырья не рекомендуется при изготовлении керамических связок;

химический состав и огнеупорность связок практически идентичны;

связки практически взаимозаменяемы.

Таблица 2.100

Химический состав связок, выпускаемых по ТУ 2-036-984-86

Марка связки	Огнеупорность, °C	Состав связок, мас. %									
		SiO_2	Fe_2O_3, не более	Al_2O_3	CaO, не более	TiO_2, не более	MgO	B_2O_3	K_2O	Na_2O	п.п.п., не более
К3ПГ	1380–1430	59,0–63,0	1,0	21,0–25,0	1,0	1,0	До 1,0	–	6,0–9,5	1,4–3,0	5,0
К3М	1380–1430	59,0–63,0	0,8	21,0–25,0	1,0	1,0	До 1,0	–	6,0–9,5	1,4–3,0	5,0
К3ПГЕ	1380–1430	64,0–70,0	1,0	19,0–22,5	1,0	1,0	До 1,0	–	3,9–5,5	2,2–3,5	5,0
К3ФППГ	1390–1410	58,0–64,0	1,0	20,0–24,0	1,0	1,0	до 1,0	2,0–3,0	5,0–7,5	1,5–2,5	5,0
К5ПГ	1140–1160	58,0–61,0	1,0	14,0–18,0	1,0	1,0	2,2–4,0	5,0–7,0	4,0–7,0	1,8–3,5	5,0
К5М	1140–1160	58,0–61,0	1,0	14,0–18,0	1,0	1,0	2,2–4,0	5,0–7,0	4,0–7,0	1,8–3,5	5,0
К7ПГ	1140–1180	54,0–68,0	1,0	14,0–17,0	1,0	1,0	2,2–4,0	5,5–8,0	3,5–6,0	1,5–3,0	5,0
К8ПГ	1250–1280	58,0–62,0	1,0	20,0–24,0	1,0	1,0	2,2–3,0	–	4,0–7,5	1,2–2,5	5,0
К8М	1250–1280	58,0–62,0	1,0	20,0–24,0	1,0	1,0	2,2–3,0	–	4,0–7,5	1,2–2,5	5,0
К9ПГ	1170–1190	58,0–63,0	1,0	16,0–20,0	1,0	1,0	1,6–3,0	5,0–7,0	3,5–7,0	1,5–3,0	5,0
К9М	1170–1190	58,0–63,0	1,0	16,0–20,0	1,0	1,0	1,6–3,0	5,0–7,0	3,5–7,0	1,5–3,0	5,0
К10ПГ	1250–1300	58,0–63,0	1,0	15,0–24,0	1,0	1,0	0,3–1,3	3,0–5,0	5,0–9,0	1,7–3,2	5,0
К10М	1250–1300	58,0–63,0	1,0	15,0–24,0	1,0	1,0	0,3–1,3	3,0–5,0	5,0–9,0	1,7–3,2	5,0
К10ПГЕ	1250–1300	62,7–68,2	1,0	17,0–20,0	1,0	1,0	до 1,0	2,0–5,0	3,6–5,0	2,0–4,0	5,0
К15ПГ	1250–1300	58,0–63,0	1,0	19,0–22,0	1,0	1,0	1,0–2,3	2,5–4,0	4,0–8,0	1,5–3,0	5,5
К15М	1250–1300	58,0–63,0	1,0	19,0–22,0	1,0	1,0	1,0–2,3	2,5–4,0	4,0–8,0	1,5–3,0	5,5
К15ПГЕ	1250–1300	61,0–67,0	1,0	17,0–21,0	1,0	1,0	1,0–2,3	2,5–4,0	3,0–5,5	2,0–3,0	5,5
К20ПГ	1230–1250	58,0–63,0	1,0	18,0–22,0	1,0	1,0	1,0–2,3	3,0–4,5	4,5–6,5	1,5–2,7	6,0
К20М	1230–1250	58,0–63,0	1,0	18,0–22,0	1,0	1,0	1,0–2,3	3,0–4,5	4,5–6,5	1,5–2,7	6,0
К20ПГЕ	1230–1250	57,0–68,0	1,0	15,0–22,0	1,0	1,0	1,0–2,3	3,0–4,5	2,3–4,5	2,0–4,0	6,0
К71ПГ	1200–1250	58,0–64,0	1,0	17,0–21,0	1,0	1,0	1,0–3,0	4,0–6,0	3,5–6,0	1,5–3,0	7,0
К71М	1200–1250	58,0–64,0	1,0	17,0–21,0	1,0	1,0	1,0–3,0	4,0–6,0	3,5–6,0	1,5–3,0	7,0
К71ПГЕ	1200–1250	59,5–65,5	1,0	16,0–20,0	1,0	1,0	1,0–3,0	4,0–6,0	2,8–5,0	2,0–3,3	7,0

Примечание. ПГ — связка на огнеупорной глине Положского месторождения; ПГЕ — связка на огнеупорной глине Положского месторождения и пегматите Елисеевского месторождения; М — связка на каолине мокрого обогащения.

Таблица 2.101

Химический состав сырьевых материалов, применяемых для изготовления связок по ТУ 3989-014-05748371–99

Наименование сырьевых материалов, обозначение нормативной документации	Состав материала, мас. %												Особые требования
	SiO_2	Fe_2O_3, не более	Al_2O_3	CaO, не более	TiO_2, не более	MgO, не более	B_2O_3, не менее	K_2O	Na_2O	Li_2O	F, не менее	п.п.п, %	
Полевые шпаты марок ПШК 0,20-2; ПШК 0,20-3, ГОСТ 7030–75	65,0–75,0	0,10–0,20	12,00–20,00	1,00	0,50	0,50	–	7,30–12,50	1,50–2,70	–	–	До 1,00	Содержание свободного кварца – не более 8 %, калиевый модуль – не менее 2–3
Каолин обогащенный марок КФ-2, КФ-3, ГОСТ 21286–82	46,6–48,0	0,80–1,20	33,50–35,20	1,00	1,00	1,0	–	0,50–1,00	0,10–1,00	–	–	3,00–14,00	
Каолин сухого обогащения месторождения Журавлиный Лог, ТУ 5789-090-00284530–00	46,6–48,0	0,80–1,20	33,50–35,20	0,80–1,50	0,60–1,00	0,42–1,00	–	0,50–1,00	0,10–1,20	–	–	13,00–13,50	
Глина огнеупорная Ново-Райского месторождения марок ДН-0, ДН-1, ТУ 14-8-183–75	49,0–54,5	0,80–1,20	26,0–34,0	0,70–1,10	1,5	0,40–1,80	–	1,30–2,90	0,30–0,50	–	–	10,00–14,00	
Глина огнеупорная латненская, ТУ 14-8-183–75	49,0–50,5	0,80–1,20	40,00–43,00	1,00	1,0	1,0		1,30–2,00	0,30–0,50	–	–	10,00–14,00	
Тальк молотый марки ГМК-28, ГОСТ 21234–75	56,0–60,0	2,7–5,5	0,6–2,5	0,4–1,2	–	29,0–31,0	–	0,2	0,2	–	–	4,6–7,5	–

Окончание табл. 2.10

Фритта боросиликатная, ТУ 11-77-0V0735.069	68,0–70,0	0,2	2,3–3,7	1,0	–	1,0	17,0	3,5–4,5	3,5–4,5	–	–	–	–
Фритта борлитийсиликатная ТУ 5946-21-05748371–97	64,0–68,0	0,2	2,0–4,0	1,0	–	1,0	16,0–19,0	3,0–4,0	3,5–4,5	4,0–5,0	–	–	–
Волластонитовый концентрат, ТУ 640РК 15105756-01–97	49,0–54,0	1,2	2,5–3,5	36,0–44,0	1,0	1,0	1,0	0,5–1,0	0,1–1,0	Следы	–	8	–
Криолит искусственный технический марки КП, ГОСТ 10561–80	Не более 1,5	Не более 0,1	Не более 23,0	–	–	–	–	–	Не более 13,0	–	Не менее 52,05	–	–
Полевой шпат производства Финляндии (по контракту)	65,5–70,0	0,05–0,08	1,10–1,30	0,50	0,50	–	8,40–9,00	3,80–4,20	–	–	9,0–10,0	–	Содержание свободного кварца – не более 8 %, модуль – не менее 2–3
Глина огнеупорная латненская, ТУ 14-8-152–75	49,0–50,5	0,80–1,20	40,00–43,00	1,00	1,0	1,0	–	1,30–2,00	0,30–0,50	–	–	10,00–14,00	–

Таблица 2.102

Химический состав связок, выпускаемых по ТУ 3989-014-05748371—99

Марка связки	Состав связок, мас. % (Абсолютная погрешность ±*A*)												Огнеупорность, °C
	SiO_2 (±0,6)	Fe_2O_3, не более (±0,05)	Al_2O_3 (±0,5)	CaO, не более (±0,05)	TiO_2, не более (±0,05)	MgO (±0,1)	B_2O_3 (±6,2)	Li_2O (±0,18)	K_2O (±0,2)	Na_2O (±0,2)	F, не менее (±0,3)	п.п.п., не более (±0,15)	
К-3	59,0–63,0	1,15	20,0–24,0	1,0	1,0	0,1–1,0	–	–	6,0–9,5	1,4–3,0	–	5,0	1380–1430
К-5	58,0–63,0	1,15	14,0–18,0	1,0	1,0	2,5–4,0	5,0–7,0	–	4,0–7,0	1,9–3,5	–	5,0	1140–1180
К-10	58,0–63,0	1,15	15,0–24,0	1,0	1,0	0,3–1,1	3,0–4,5	–	4,5–8,5	1,7–3,2	–	5,0	1250–1300
К-12	60,0–63,0	1,15	18,0–20,0	3,0–4,5	1,0	0,1–1,5	2,5–4,5	–	5,0–8,0	1,5–4,5	–	5,0	1200–1250
К-15	58,0–63,0	1,15	19,0–22,0	1,0	1,0	1,0–1,2	2,5–4,0	–	4,0–8,0	1,5–3,3	–	5,0	1250–1300
К-20	58,0–63,0	1,15	19,0–22,0	1,0	1,0	1,5–2,3	2,8–4,5	–	2,7–7,0	1,5–3,0	–	6,0	1250–1300
К-43	54,0–60,0	1,15	15,0–19,0	1,0	1,0	0,3–1,1	4,8–5,5	1,0–2,0	3,5–7,0	1,5–6,0	5,5	4,0	900–960

Таблица 2.103

Шихтовой состав керамических связок и рекомендуемые области их применения

Марка связки	Компонент связок, вес. %								Область применения монокорунда
	Полевой шпат	Огнеупорная глина, каолин	Боросиликатная фритта	Борлитийсиликатная фритта	Борокальциевая фритта	Тальк	Криолит	Волластонитовый концентрат	
К5, К5ПГ, К5М	30–32	30–33	30–28	–	–	10–8	–		Для изготовления кругов из белого и нормального электрокорунда; монокорунда высотой до 80 мм до твердости СМ2 (включительно) с $V_{раб}$ = 35–60 м/с
К30	30	40	30	–	–	–	–		
К20, К20ПГ	43–40	30–35	20	–	–	5	–	–	Для изготовления кругов из белого и легированных электрокорундов высотой 80 мм, твердостью С1 и выше ($V_{раб}$ = 35–60 м/с)
К20М	44–42	40–42	–	–	–	5	–	–	
К8М	–	–	–	–	–	16–14	–	–	
К20, К20М	43–40	30–35	20	–	–	5–4	–	–	Для изготовления кругов диаметром 750–1100 мм, твердостью до СМ2, высотой до 80 мм ($V_{раб}$ = 35–60 м/с)
К15, К15ПГ	46–48	35–32	15	–	–	5–4	–	–	Для изготовления кругов из белого и нормального электрокорунда твердостью СТ2-ВТ ($V_{раб}$ = 35–60 м/с)
К15М	46	32	15	–	–		–	–	
К12, К12М	45–43	30–28	13–18	–	–	–	–	12–10	Для изготовления кругов из белого и нормального электрокорунда высотой 80 мм и более, твердостью С2 и выше ($V_{раб}$ = 35–60 м/с), чашек конических и цилиндрических
К43, К43М	30–40	20	–	30–40	–	–	10–8	–	Для изготовления инструмента из белого и легированных электрокорундов ($V_{раб}$ = 60–80 м/с)
К50, К50М	30–40	30	–	–	30–34	0–6	–	–	
К71ПГ, К71М	32–34	34–32	30–28	–	–	4–6	–	–	Для изготовления инструмента из нормального электрокорунда
К3, К3ПГ, К3М	70–80	30–20	–	–	–	–	–	–	Для изготовления кругов из карбида кремния всех твердостей ($V_{раб}$ = 35 м/с)
К10, К10ПГ, К10М	55–50	30–25	20–25	–	–	–	–	–	Для изготовления кругов из карбида кремния твердостью до С2 ($V_{раб}$ = 35–50 м/с)

Однако при этом необходимо помнить, что заводы — производители связок, меняя шихтовый состав, могут изготовить связки в соответствии с техническими условиями, но при изготовлении инструмента могут возникнуть проблемы получения инструмента заданной твердости. Кроме того, технология изготовления связок также различна.

В связи с экономическими проблемами в 1995 году некоторые заводы России возобновили производство своих связок, качество которых значительно хуже, чем связок, выпускаемых по указанным выше техническим условиям.

2.2.6. Керамическое сырье для производства связок и связки зарубежных фирм

Сырьевые материалы, применяемые в технически развитых странах, отличаются следующими характеристиками.

Полевошпатовые материалы, как правило, содержат менее 10 % кварца, не менее 16 % ($K_2O + Na_2O$) (после флотационного обогащения в целях удаления кварца и слюды) и могут быть использованы в различных отраслях промышленности.

Раздельное производство полевого шпата и кварца обеспечивает возможность поставлять потребителям материалы с различной тониной помола.

Полевые шпаты усреднены и отличаются постоянством состава в партии и во времени.

Ряд фирм поставляет потребителям не полевые шпаты отдельных месторождений, а полевошпатовые композиции для конкретной области применения (например, для изготовления инструмента из карбида кремния), составленные с учетом специфических особенностей сырья отдельных месторождений и требований потребителя.

Нефелиновый сиенит Канадского месторождения в отличие от нефелинополевошпатового концентрата Вышневоградского рудоуправления (Россия) содержит: несколько больше щелочи (примерно на 2 % и меньше), 0,19 % Fe_2O_3 вместо 0,3 %. Сырьевые материалы, используемые фирмами, — полевой шпат и нефелиновый сиенит более тонкого помола, массовая доля фракции, %: 28–20 мкм — 26,4–27,7; 20–14 мкм — 8,9–14,0; 14–10 мкм — 3,2–31,8; 10–7 мкм — 8,0–18,8; 7–5 мкм — 1,8–4,7; 5–0 мкм — 19,0–36,7.

Использование в отечественной промышленности полевых шпатов с содержанием кварца от 10 % и более вызывает, по мнению фирм, потерю прочности и шлифующей способности инструмента более 20 %. С этим нельзя полностью согласиться.

Зарубежные фирмы при увлажнении формовочных смесей из корундовых материалов используют парафиновые эмульсии, а отечественные производители — жидкое стекло, которое снижает огнеупорность связок на 100–150 °C, повышает реакционную способность связки, и тем самым повышается механическая прочность обожженного образца и, следовательно, шлифующая способность инструмента.

Что же касается инструмента из SiC, особенно на связке К3, то содержание кварца уменьшает прочность и ухудшает эксплуатационные свойства инструмента.

Из месторождений каолинов и глин наиболее известными являются: цетлицкий каолин (район Карловых Вар, Чехия; имеет белый цвет и в отмучен-

ном виде хорошую пластичность); английские каолины (месторождения вблизи Корнуолла и Девоншира), немецкие каолины (в окрестностях Кемплитце, Мейсена), месторождения глин во Франции (к югу от Лиможа), китайские каолины (Тунг-Суанг) отличаются повышенным содержанием кремнезема SiO_2, они богаты оксидами калия и магния. Из американских глин известны весьма тонкие и высокопластичные глины типа "Болклей", находящиеся в штатах Кентукки и Теннеси, число пластичности которых равно 27, запесоченность 1,5 %.

Микроскопический анализ зарубежных глин показал, что основная масса глины состоит из частиц размером 20—0 мкм. Кроме того, комовые глины типа "Болклей" содержат значительное количество иллита. Этот глинистый материал в инструменте успешно предотвращает разрыв больших шлифовальных кругов в процессе обжига. В отмученном каолине нет достаточного количества иллита, поэтому отдельные зарубежные фирмы не рекомендуют его применение в производстве керамических связок. Отдельные фирмы в составе керамических связок используют два вида глины либо смесь глины и каолина (например, в Германии применяют связки марок V401—V406).

Известно, что в США и Канаде для производства керамических связок используются: высококалиевый полевой шпат, экспортируемый из Скандинавии; нефелиновый сиенит канадского месторождения "Блу-Маунти" после обогащения (обогатительная фабрика в г. Лейкфилд) и каолинит — гидрослюдистая глина типа "Болклей".

Потребители получают затаренную обогащенную продукцию с тониной помола, не требующей доизмельчения, что позволяет зарубежным фирмам строить участки по производству керамических связок без переработки и измельчения сырьевых материалов.

Необходимо отметить, что зарубежные фирмы применяют более широкий ассортимент керамических связок (V), чем отечественные зарубежные заводы. Так, фирма Universal Crending Wheel (Англия) применяет 36 марок керамических связок, фирма Norton (США) — 23 марки, фирма Molemab (Италия) — 10 марок, фирма Noritake (Япония) — 15 марок, фирма Bay State (США) — 16 марок и т. д.

При этом связки разрабатываются:

для определенных видов шлифматериалов: например, фирма FAG Kugelfischer (Германия) изготавливает для электрокорундовых материалов связки марок V101, V200—V203, V300—V303, V4001, для карбидкремниевых — V500—V505, V5051, V5081, фирма Norton (США) выпускает для карбида кремния связку марки Vk, для электрокорунда марок 57A, 23A, 32A — связку марки VBA и т. д.;

для определенных операций шлифования: например, фирма Naxos-Union (Германия) изготавливает связки Ke100 для плоского шлифования, заточки инструмента; фирма Slip Naxos (Швеция) применяет связки марок VTP, VMP для высокопористого инструмента и т. д.; фирма Carborundum (США) изготавливает связки марок V10 (для шлифования быстрорежущих сталей), V11 (для шлифования инструментальных и твердых сталей), VT и V20 (для обдирочных кругов для шлифмашинок); V40 (для шлифования сталей), VD, V67 (для обдирочных операций для работы со скоростью 35 м/с), V80 (для бесцентрового чистового шлифования), VE (для шлифования карбидов, заточки,

чистовой обработки), VGC (для бесцентрового шлифования), VR (для облицовочного шлифования карбидов) и т. д.

Фирма Tyrolit (США) разработала новую связку [Cristalline Stabilized Sintered (CSS)] для шлифовальных кругов, предназначенных для круглого наружного и бесцентрового шлифования. Новая связка представляет собой керамические волокна, связывающие абразивные зерна в монолитную структуру. При этом обеспечивается снижение стоимости кругов, повышение их точности на 30 %, увеличение стойкости кругов, повышение точности обработки и стабильности процессов шлифования. Аналогичные шлифовальные круги серии Columbia предназначены для внутреннего шлифования [124].

Иногда производство керамических связок сосредоточено на одном из заводов, а затем они рассылаются по своим филиалам (например, так работает фирма Norton, США). Некоторые фирмы занимаются поставкой готовых керамических связок для различных абразивных материалов и инструментов.

Примеры шихтового состава зарубежных керамических связок, их огнеупорность, а также химический состав сырья представлены в табл. 2.104, 2.105, из которых видно, что для производства керамических сырья зарубежные фирмы

Таблица 2.104

Пример шихтовых составов керамических связок зарубежных фирм

Наименование компонента	США				Германия	
	"Джи энд Би" для электрокорунда белого	Norton				
		Для нормального электрокорунда	Для электрокорунда белого	Для карбида кремния	Для электрокорунда	Для карбида кремния
Глина типа «Болклей»	30	20	32	10–10,5	–	–
Глина огнеупорная	–	–	–	–	20–44	24,0
Глина легкоплавкая	–	–	–	–	20–44	24,0
Нефелиновый сиенит	50–40	–	–	–	–	–
Полевой шпат	–	15	36,7	41–74	38–53	53–69
Фритта	20–30	18,2	–	–	–	–
Известковый шпат	–	–	–	–	3,0–4,0	–
Мука кварцевая	–	24,5	6,0	35,0	–	5,0
Мука известковая	–	3,3	2,5	–	–	2,0
Мука из листового стекла	–	–	–	–	11,0	6,0–11,0
Силикат	–	6,0	9,5	–	–	–
Бура	–	–	6,6	–	–	–
Сода кальцинированная	–	–	3,0	–	–	–
Мука фарфоровая	–	–	–	–	2,0	20,0
Бентонит	–	10,2	–	5,0	–	–
Каолин	–	–	–	–	–	21–30
Магнезия обожженая	–	3,3	4,0	–	–	–
Добавки	–	–	–	Mn-0,0–0,5	–	–
Огнеупорность, °С	1190–1170	1180–1200	1200–1250	1200–1220	1260–1350	1300–1390
Температура обжига, °С	1250	1250–1300	1250–1300	1250	1170–1250	1170–1250

Таблица 2.105

Химический анализ полевошпатового сырья, огнеупорных глин и каолинов зарубежного производства

Наименование сырья, месторождения (страна)	Состав, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.
Калиевые полевые шпаты									
Финское "Кимито"	68,10	19,00	Следы	0,07	0,28	0,30	11,28	2,54	0,70
Норвежское	69,22	17,04	–	Следы	–	0,25	10,90	1,55	0,83
Шведское	65,20	19,86	0,12	Следы	0,52	–	12,98	1,47	0,18
Канадское	68,11	16,27	0,20	0,09	0,50	0,17	10,40	3,20	0,41
Нефелиновый сиенит (Канада)	60,70	21,60	0,19	0,07	0,46	0,38	5,10	10,50	0,43
Глины огнеупорные									
С178 (США)	53,5–58,0	27,0–31,0	1,20	1,18–1,20	0,27	0,48	1,0		9,89
С1648 (США)	52,5–57,0	25,0–29,0	1,88	1,56	0,30	0,65	0,5–0,65		12,0–13,7
Типа "Болклей" (США)	53,0–57,3	27,38–30,00	0,98–1,00	1,20–1,56	0,55–0,56	0,60–0,80	1,10–1,20		10,7–13,5
Каолины обогащенные									
Корнуэльское (Англия)	46,86	38,10	0,30	–	0,46	0,48	1,48		12,12
Штата Джорджия (США)	45,12	36,64	0,40	1,00	0,41	0,25	0,59		13,60
Кемлицкое (Германия)	58,30	29,31	0,87	0,51	Следы	0,12	1,26		10,52
Мейсенское (Германия)	46,16	38,68	0,91	Следы	0,42	0,08	1,76		12,57
Цетлицкое (Чехия)	49,67	36,47	0,88	0,09	0,36	–	0,59		12,16
Монг-Та (Китай)	54,55	30,27	0,90	–	0,87	0,09	3,82		2,10

Таблица 2.106

Химический состав керамических связок зарубежных стран (пример)

Страна, фирма	Состав связок, мас. %											Область применения
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	B_2O_3	CoO	п.п.п.	
Германия, FELD-MUHLE	61,5–68,8	12,6–18,8	0,6–2,2	0,5–1,3	1,6–2,9	0,8–1,1	4,8–6,6	4,8–6,6	1,5–4,1	–	4,6–7,7	Для электрокорунда
	67,6–69,6	18,0–18,3	0,8–1,6	0,2–1,0	1,1	0,7–0,9	6,0	6,0	–	–	3,6–4,2	Для карбида кремния
Канада, "Джи энд Би"	53,0–58,5	22,0–22,4	0,5–1,0	0,15–0,30	1,3–2,7	0,10–0,12	6,4–8,1	1,8–4,9	2,7–4,9	–	3,0–4,0	Для электрокорунда
Чехия, CARBORUNDUM ELECTRITE	63,3–69,6	18,3–18,5	0,6–0,8	0,2	1,6	0,1	0,9	4,5	0,7	–	2,5–3,6	Для электрокорунда
Италия, MOLEMAB	47,53	17,35	0,50	0,06	0,64	0,28	0,14	8,18	28,17	–	2,2–3,0	Для электрокорунда
Япония, NORITAKE	58,7	14,6	1,59	0,23	2,20	–	5,0	5,40	13,4	–	3,30	Для электрокорунда
Австрия, TYROLIT	65,4	9,85	1,15	0,10	1,50	–	8,50	4,60	9,50	1,15	3,40	Для электрокорунда
США, NORTON	47,53	17,35	0,50	0,1	0,64	0,28	0,14	8,18	28,17	–	4,1	Для электрокорунда
Англия, CARBORUNDUM	54,0	24,0	0,28	2,03	3,50	4,45	4,35	3,80	3,70	–	3,30	Для электрокорунда

используют различное керамическое сырье, огнеупорность связок для карбида кремния до 100 °С выше, чем для электрокорунда, связки в основном борные, в отдельных связках содержится Li_2O, для окраски инструмента применяют красители типа CoO, Fe_2O_3 и др. (табл. 2.105, 2.106).

2.3. Основы технологического процесса производства керамических связок

Процесс производства керамических связок в отечественной промышленности (до настоящего времени) осуществлялся на нескольких абразивных заводах и вновь организованных предприятиях с использованием различных схем переработки компонентов связок и оборудования для их измельчения.

2.3.1. Сухой способ приготовления керамических связок и оборудование для их производства

Процесс дробления компонентов керамических связок производится в щековых и конусно-инерционных дробилках, а процесс измельчения — в шаровых и ролико-маятниковых мельницах или молотковых дробилках; на отдельных заводах последняя стадия осуществляется в замкнутом цикле с циклоном и грохотом.

Наиболее простой схемой производства керамических связок является схема переработки сырьевых материалов, представленная на рис. 2.47 и включающая следующие технологические операции:

линия переработки полевого шпата (см. рис. 2.47, *а*) — материал крупностью до 340 мм из расходного бункера *1* кареточным питателем *2* подается в щековую дробилку *3*, откуда измельченный до крупности 50—70 мм элеватором *4* транспортируется в промежуточный бункер *5* и далее в шахтную печь *6* для сушки. Высушенный материал направляется в другой промежуточный бункер *7*, из которого питателем *8* подается в молотковую дробилку *9*, откуда элеватором *10* загружается в расходный бункер *11* и далее кюбелями *12* отправляется на линию измельчения и смешивания компонентов связок;

линия переработки глины (см. рис. 2.47, *б*) — материал крупностью до 300 мм грейфером загружается в кюбели *7* с последующей разгрузкой в расходный бункер *1*, из которого подается в глинорезательную машину *2*, измельчающую материал до крупности частиц 40—50 мм, откуда с помощью транспортера *3* направляется в сушильный барабан *4*. Просушенный материал элеватором *5* подается в расходный бункер *6* и далее кюбелями *7* транспортируется на линию измельчения и смешивания связок;

линия переработки фритты (см. рис. 2.47, *в*) — фритта высыпается из мешков в кюбели *1* и загружается в камерное сушило *2*, затем самотеком направляется в расходный бункер *3* и далее кюбелями *4* на линию измельчения и смешивания связок;

линия измельчения и смешивания компонентов связки (см. рис. 2.47, *г*) — компоненты связки из расходных бункеров кюбелями *1* транспортируются на весы, взвешиваются и загружаются в смесительный барабан *2*, где производится их измельчение и одновременное смешивание в течение 10—11 ч, после чего

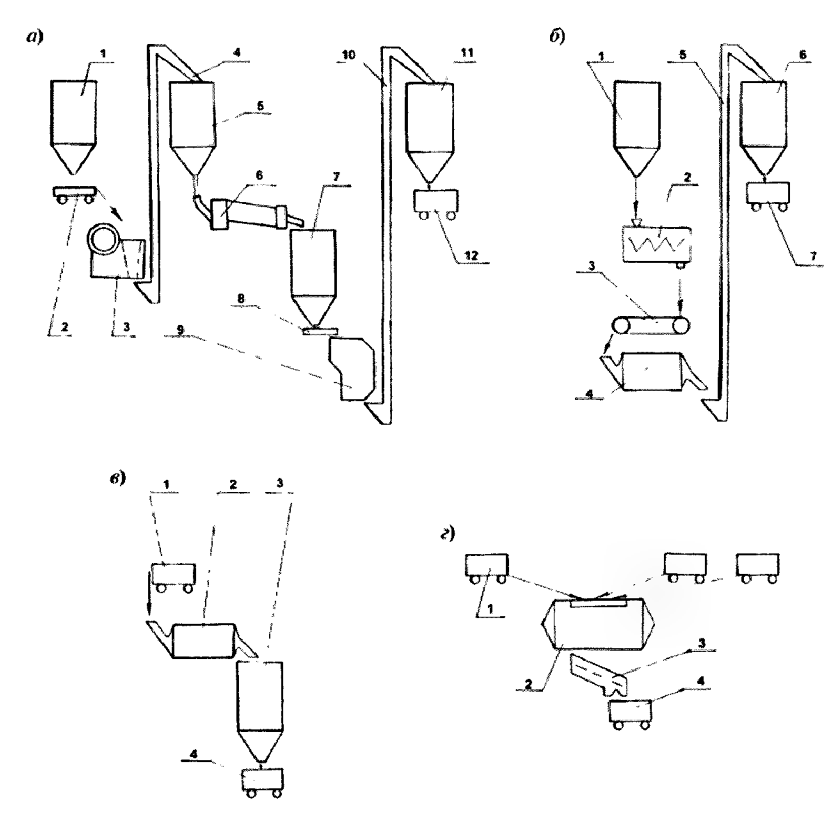


Рис. 2.47. Схема № 1 производства керамических связок:

а — переработка полевого шпата: *1* — расходный бункер полевого шпата; *2* — кареточный питатель; *3* — щековая дробилка; *4* — ковшовый элеватор; *5* — промежуточный бункер; *6* — шахтная печь; *7* — промежуточный бункер; *8* — питатель; *9* — молотковая дробилка; *10* — ковшовый элеватор; *11* — расходный бункер; *12* — кюбель; *б* — переработка глины: *1* — расходный бункер глины; *2* — глинорезательная машина; *3* — транспортер; *4* — сушильный барабан; *5* — ковшовый элеватор; *6* — бункер готовой продукции; *7* — кюбель; *в* — переработка боросиликатной фритты: *1* — кюбель с исходным материалом; *2* — камерное сушило; *3* — расходный бункер; *4* — кюбель; *г* — измельчение и смешивание компонентов керамических связок: *1* — кюбели компонентов; *2* — смесительный барабан; *3* — грохот; *4* — кюбель готовой связки

готовая связка через люк смесителя подается на контрольную сетку грохота *3* для рассева и далее в кюбель *4* для транспортирования на участок затаривания.

Несмотря на различие физических свойств компонентов, получение связки с однородной тониной помола обеспечивается последовательностью загрузки шаровой мельницы, осуществляемой в следующем порядке: фритта — полевой шпат — тальк — криолит или другие добавки — огнеупорная глина — каолин. Помол глины, загружаемой в шаровую мельницу по окончании помола полевого шпата и перлита, значительно облегчается по сравнению с помолом их в отдельной мельнице.

Интенсификация помола компонентов связок осуществляется за счет установления оптимального соотношения между массой мелющих тел, загружаемых в мельницу, и измельчаемых материалов. В качестве измельчающих тел целесообразно применять уралитовые шары. Соотношение измельчаемых материалов к массе шаров 1 : 1,3 или 1 : 2. При применении уралитовых шаров тонина помола связок, характеризующаяся остатком на сите 0063, не превышающем 3 %, достигается за 10—11 ч (включая время загрузки и выгрузки мельницы — 3 ч). Средний удельный расход уралитовых шаров на 1 т связок составляет примерно 1,0—1,3 т.

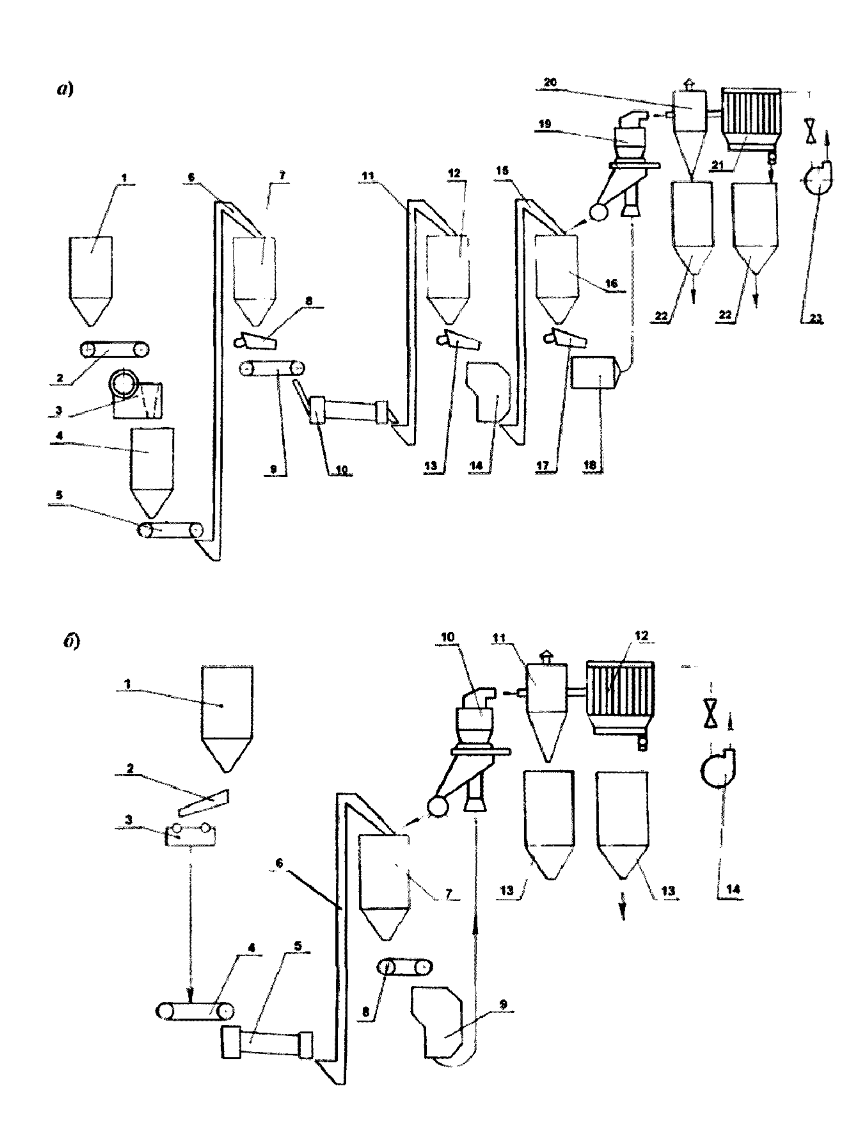
Для снижения намола железа барабанные мельницы футеруются, например, резиной.

К недостаткам указанной технологической схемы получения керамических связок относятся: низкая производительность, ручной труд на операциях загрузки и выгрузки, значительное пылевыделение, превышающее допустимые нормы.

По второй схеме (рис. 2.48) переработка компонентов керамических связок производится по следующим технологическим операциям:

линия переработки полевого шпата (см. рис. 2.48, *а*) — материал крупностью до 340 мм из расходного бункера *1* пластинчатым питателем *2* подается в щековую дробилку *3* модели СМ-11Б, где измельчается до крупности 25 мм. Далее через промежуточный бункер *4* транспортером *5* и ковшовым элеватором *6* транспортируется в расходный бункер *7*, из которого с помощью вибропитателя *8* и транспортера *9* загружается в сушильный барабан *10*, работающий при температуре до 450 °С. Из сушильного барабана посредством ковшового элеватора *11* через промежуточный бункер *12* вибропитателем *13* подается в молотковую дробилку *14* модели СМ-281М, где дробится до крупности 2 мм. Дробленый материал посредством ковшового элеватора *15* через промежуточный бункер *16* вибропитателем *17* направляется на измельчение в роликомаятниковую мельницу *18* модели СМ-493, работающую в замкнутом цикле с воздушным сепаратором *19*, циклоном *20* и фильтром *21*. Исходный материал из фильтра через расходный бункер *22* подается вибротранспортом на линию смешивания;

линия переработки глины (см. рис. 2.48, *б*) — исходный материал крупностью до 300 мм из расходного бункера *1* питателем *2* подается в глинорезательную машину *3*, откуда крупностью до 40 мм транспортером *4* загружается в сушильный барабан *5*, отапливаемый газом с температурой сушки, равной 450 °С, затем с помощью ковшового элеватора *6* через промежуточный бункер *7* пластинчатым питателем *8* подается в роликомаятниковую мельницу *9*, работающую в замкнутом цикле с воздушным сепаратором *10*, циклоном *11*


а)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
22
23
б)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
13
14

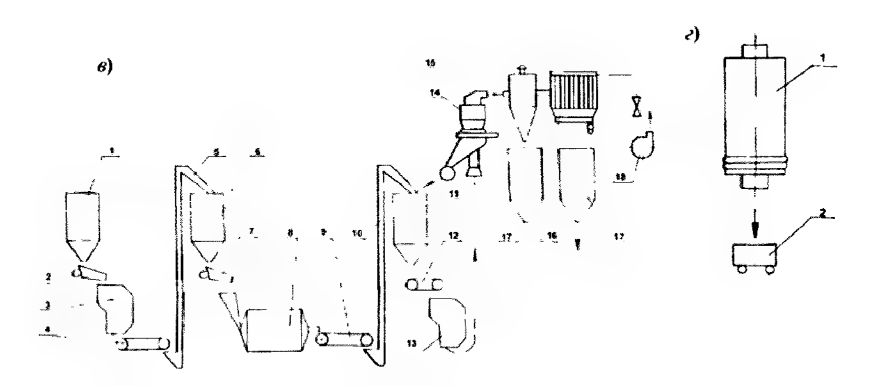


Рис. 2.48. Схема № 2 производства керамических связок:

а — переработка полевого шпата: *1, 22* — расходный бункер; *2* — пластинчатый питатель; *3* — щековая дробилка; *4, 12, 16* — промежуточный бункер; *5, 9* — транспортер; *6, 11, 15* — ковшовый элеватор; *7* — расходный бункер; *8, 13, 17* — вибропитатель; *10* — сушильный барабан; *14* — молотковая дробилка; *18* — ролико-маятниковая мельница; *19* — воздушный сепаратор; *20* — циклон; *21* — воздушный фильтр; *23* — вентилятор; *б* — переработка глины: *1* — расходный бункер; *2* — питатель; *3* — глинорезательная машина; *4* — транспортер; *5* — сушильный барабан; *6* — ковшовый элеватор; *7* — промежуточный бункер; *8* — пластинчатый питатель; *9* — роликомаятниковая мельница; *10* — воздушный сепаратор; *11* — циклон; *12* — воздушный фильтр; *13* — бункер готового продукта; *14* — вентилятор; *в* — переработка боросиликатной фритты: *1* — расходный бункер; *2, 7* — вибропитатель; *3* — молотковая дробилка; *4* — транспортер; *5, 10* — ковшовый элеватор; *6, 11* — промежуточный бункер; *8* — электрический сушильный барабан; *9* — ленточный транспортер; *12* — вибротруба; *13* — роликомаятниковая мельница; *14* — воздушный сепаратор; *15* — циклон; *16* — воздушный фильтр; *17* — бункер готового продукта; *18* — вентилятор; *г* — смешивание компонентов связок: *1* — пневмосмеситель керамических связок; *2* — кюбель с готовой связкой

и воздушным фильтром *12*. Исходный материал из фильтра через бункер готового продукта *13* вибротранспортом подается на линию смешивания;

линия переработки боросиликатной фритты (см. рис. 2.48, *в*) — исходный материал крупностью до 20 мм из расходного бункера *1* вибропитателем *2* подается в молотковую дробилку *3* модели С218М, откуда крупностью до минус 2 мм с помощью ленточного транспортера *4* ковшовым элеватором *5* через промежуточный бункер *6* вибропитателем *7* направляется на сушку в сушильный барабан *8*, работающий при температуре 450 °С. Затем ленточным транспортером *9* и ковшовым элеватором *10* через промежуточный бункер *11* вибротрубой *12* передается в роликомаятниковую мельницу *13*, работающую в замкнутом цикле с воздушным сепаратором *14*, циклоном *15* и воздушным фильтром *16*. Измельченный материал из фильтра через бункер готового продукта *17* вибротранспортом подается на линию смешивания;

линия смешивания (см. рис. 2.48, *г*) — готовые измельченные компоненты связки из бункеров готового продукта линии переработки компонентов *22*, *13* и *17* (см. рис. 2.48) вибротранспортом, пройдя предварительно весовое дозирование, загружаются в пневмосмеситель керамических связок *1* модели СИ-4, откуда кюбелями *2* отправляются на затаривание.

Сравнение двух схем производства керамических связок показывает преимущества второй схемы:

более высокая (в два-три раза) производительность по сравнению с первой схемой;

возможность разделения частиц по крупности в воздушных сепараторах.

В табл. 2.107 представлены режимы смешивания и измельчения в зависимости от типа применяемого оборудования. Как видно из табл. 2.107, при сме-

Таблица 2.107

Режимы смешивания керамических связок

Наименование продукции	Операция	Наименование и тип смесителя	Масса компонентов на один цикл, т	Количество доз при взвешивании	Длительность смены $T_{см}$, мин	Технологическое время смешивания $t_м$, мин	Длительность цикла $T_ц$, мин	Время занятости на смеситель, чел.-мин		Коэффициент занятости в смену $K_з$
								на цикл ($t_ц$)	на смену ($t_з$)	
Связка	Смешивание	Смесительный барабан ШР-3	2	4	480	90	210	140	320	0,78
			1,5	7	480	80	130	97	358	0,81
		Пневмосмеситель СИ-4	1,3	4	445	40	106	66	277	0,68
Связка крупнозернистая	Помол и смешивание	Шаровая мельница МБ-27	2	4	460	630	780	180	107	0,25
Связка мелкозернистая			2	4	460	1200	1370	235	79	0,19

шивании связки в пневмосмесителе время смешивания меньше в два раза, чем в шаровых мельницах.

Анализ зернового состава связок (табл. 2.108, рис. 2.49), проведенный на фотоэлектрическом приборе, показал, что керамические связки неоднородны по зерновому составу как по фракции минус 100 — плюс 80, так и по фракции минус 5 мкм (отличие в два раза). Анализ керамических связок отдельных зарубежных фирм показывает, что связки в основном состоят из фракции минус 40 мкм и мельче.

Таким образом, анализ работы действующих предприятий показал:

все заводы выпускают различные по компонентному химическому и зерновому составу керамические связки;

применяемое оборудование обеспечивает получение связок по действующей документации с весьма низкой производительностью;

все предприятия, выпускающие керамические связки, работают с нарушением ПДК по запыленности рабочего участка;

процесс смешивания характеризуется применением большого объема ручного труда, низкой производительностью и запыленностью;

качество связок по зерновому составу не соответствует мировому уровню;

упаковка связок производится вручную без применения машин для упаковки.

Анализ зарубежных аналогов связок показывает, что тонина помола как отдельных компонентов связок, так и самих керамических связок играют важную роль в увеличении работоспособности абразивных кругов.

Получение тонкодисперсных компонентов керамических связок в достаточно больших объемах (15—20 тыс. т) в промышленных условиях является сложной технической задачей, и в абразивной промышленности до 1979 года в этом направлении работ не проводилось.

Анализ современного отечественного оборудования для измельчения, классификации и улавливания пыли при получении тонкодисперсных материалов показывает:

в России и других странах СНГ и ближнего зарубежья разработано достаточное число измельчителей разных типов для тонкого измельчения материалов различной твердости (вибрационные мельницы, струйные мельницы прямо- и противоточного типов, дезинтеграторы, роторные быстроходные мельницы);

мельницы способны работать в замкнутом цикле с классификаторами отечественного производства;

появились рукавные фильтры различной производительности при эффективности улавливания свыше 99 %. Основным достоинством указанных фильтров является автоматическая очистка рукавов сжатым воздухом (пульсирующие коллекторы).

Для смешивания отдельных компонентов в целях получения керамических связок разработан и поставлен на освоение Глазовским заводом смеситель периодического действия.

Все указанные разработки по своим технико-экономическим показателям не уступают зарубежным аналогам.

Однако все перечисленное оборудование серийно в стране не выпускается. Отдельные образцы успешно работают на различных предприятиях при измельчении ферритов, цемента, циркониевого концентрата, мела и др.

Таблица 2.108

Зерновой состав связок, полученных по первой и второй схемам переработки керамических компонентов

Завод-изготовитель	Вид связки	Содержание фракции, %, при размере частиц (мкм)										
		−100...+80	−80...+63	−63...+50	−50...+40	−40...+28	−28...+20	−20...+14	−14...+10	−10...+7	−7...+5	−5
Завод № 1 (1-я схема переработки)	К15 "б"	–	–	–	3,6	5,4	8,2	11,3	10,4	4,3	6,0	50,8
	К3Т	–	–	–	5,3	4,2	5,4	6,3	7,3	4,8	8,6	57,1
	К3 "ФП"	–	–	–	6,6	7,9	8,1	7,9	6,6	5,7	4,7	52,5
	К10	–	–	–	3,3	7,5	5,8	9,3	9,7	7,6	5,3	51,5
	К71	–	–	–	3,6	5,3	11,4	7,7	14,6	3,4	4,7	49,3
	К5	–	–	–	3,9	8,7	9,2	7,6	9,5	5,6	5,1	50,4
Завод № 2 (2-я схема переработки)	К5	–	6,9	5,4	8,7	13,1	10,1	11,5	3,9	1,1	1,7	37,6
	К4	–	8,5	5,4	5,4	11,4	10,9	9,8	5,2	2,2	1,6	31,0
	К38	–	4,1	4,9	11,8	12,8	11,2	8,9	5,9	1,0	2,8	36,6
	К33	–	7,2	5,7	6,8	13,6	11,4	7,7	7,2	2,8	2,7	34,9
	К10	–	6,4	6,3	5,0	11,5	7,6	16,0	7,3	1,3	3,1	25,4
Завод № 3 (2-я схема переработки)	К9	–	–	7,7	6,1	9,2	9,0	18,4	4,9	1,7	2,0	41,0
	К1	–	–	7,0	5,6	7,4	11,1	6,4	15,3	3,4	2,2	41,6
	К8	–	–	4,8	5,8	4,4	8,2	2,2	10,3	4,0	8,0	52,3
	К5	–	–	8,6	5,1	5,2	9,2	6,5	10,1	3,2	6,7	45,4
	К5	–	–	–	8,6	10,4	5,5	7,8	13,2	7,5	0,9	46,1
Завод № 4 (1-я схема переработки)	К11	–	–	4,5	8,5	14,6	9,7	16,0	10,1	8,2	2,2	26,2
	К13	–	5,3	5,6	5,6	13,6	9,6	8,9	10,6	7,0	8,4	25,5
	К13	–	3,5	4,1	6,0	10,9	10,0	11,7	9,2	8,8	8,0	27,2
Завод № 5	1А	8,1	6,4	8,4	2,7	6,1	8,6	10,7	7,5	4,6	4,1	32,8
	2А	2,8	11,3	3,6	2,8	9,7	9,9	10,7	7,2	3,5	2,8	35,7

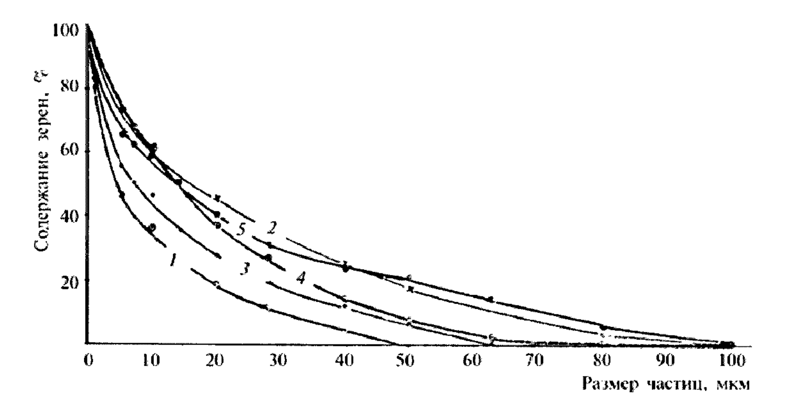


Рис. 2.49. Зерновой состав керамических связок заводов отрасли:
1 — завод № 1; *2* — завод № 2; *3* — завод № 3; *4* — завод № 4; *5* — завод № 5

При этом отсутствуют публикации по измельчаемости, удельной производительности и расходу энергии при измельчении компонентов керамических связок.

Начиная с 1985 года специалисты ВНИИАШа, Ленинградского объединения "Гипростанок" и абразивных заводов провели опытные работы по измельчению полевого шпата, огнеупорной глины и фритты с использованием различных типов измельчителей отечественного и зарубежного производства. В.В. Равикович с сотрудниками завода провел испытания трехтрубной шаровой мельницы конструкции Оргпроектцемента (Москва), работающей без сепаратора. Получена следующая производительность: по полевому шпату — 0,750—0,850 т/ч, по фритте — 0,600—0,660 т/ч.

В.В. Равикович и В.И. Кочуков с сотрудниками завода провели работу по измельчению компонентов керамических связок: полевого шпата, боросодержащей фритты, глины и смеси указанных компонентов (связка К10 состава, %: полевой шпат — 55, огнеупорная глина — 25, боросодержащая фритта — 20) на струйной мельнице противоточного типа модели МСП-0,5 с классификатором типа КОВ-600, работающей с различными энергоносителями (воздух, пар) и снабженной: компрессором типа 202ВП-10/8 производительностью 600 м^3/ч при нормальной температуре и давлении воздуха до 8 атм с мощностью электродвигателя 75 кВт; паровым котлом ППУ-3, обеспечивающим давление до 10 атм при температуре пара до 250 °С и производительность 1 т пара в час; вентилятором типа ВВД-5 с мощностью электродвигателя 4,5 кВт.

Авторы показали, что при измельчении в струйной мельнице расход энергозатрат весьма высок и существенно больше расхода электроэнергии, затрачиваемой при измельчении в других типах измельчителей. Эффект измельчения увеличивается примерно в два раза при использовании в качестве энергоносителя перегретого пара. Производительность измельчения борсодержащей фритты на 25 % меньше, чем полевого шпата, а зерновой состав крупнее примерно

в 1,5 раза (по значению медианных размеров). Первые опыты смешивания в струйной мельнице трехкомпонентной связки показали отрицательные результаты. Авторами рекомендовано для снижения энергозатрат использовать более производительные установки, например мельницы типа МСМ-5 (производительностью до 5 т/ч).

Испытание вибрационной мельницы Palla-50V с воздушным сепаратором ZnS-080 (фирма Humboldt, Германия) проведено авторами [125] при измельчении борного стекла и полевого шпата до минус 40 мкм.

При испытании в качестве мелющих тел использовали стержни из стали 20 диаметром 30–32 мм, длиной 2950 мм и общей массой 1950 кг на помольную камеру (при параллельном их подключении).

Гранулометрический состав исходных материалов представлен в табл. 2.109.

Таблица 2.109

Гранулометрический состав исходных материалов

Размеры ячейки сита, мкм	Остаток на ситах, %	
	борного стекла	полевого шпата
6000	37	32
2000	47	28,2
1000	14,5	15,6
-1000	1,5	24,2

При работе вибромельницы в замкнутом цикле с воздушным сепаратором получены следующие параметры процесса: плотность потока возвратного материала из сепаратора в мельницу достигает 2500 кг/ч; температура готового продукта на выходе из помольной камеры — до 85 °С, а на выходе из сепаратора — до 75 °С; содержание магнитного продукта в возвратном материале составляет до 0,79 % при измельчении борного стекла и до 0,65 % при измельчении полевого шпата.

Результаты испытаний вибромельницы по сравнению с рекомендациями фирмы и роликомаятниковой мельницы СМ-493 представлены в табл. 2.110.

Данные табл. 2.110 показывают, что по сравнению с действующим испытанное оборудование обеспечивает более высокую степень измельчения борного стекла и полевого шпата при пониженном удельном расходе энергии. Измельчаемость полевого шпата значительно лучше, чем борного стекла. При прочих равных условиях в готовом продукте при измельчении полевого шпата содержится 98 % фракции минус 40 мкм, в то время как при измельчении борного стекла — 84–89 %.

Сравнительные данные по гранулометрическому составу измельченных материалов представлены в табл. 2.111.

Для снижения содержания магнитного продукта в готовом материале в качестве мелющих тел целесообразно использовать стержни, изготовленные из износостойкой легированной стали в соответствии с рекомендациями ведущих зарубежных фирм. Уровень шума работающей мельницы превышает сани-

Таблица 2.110

Результаты испытаний вибромельницы Palla-50U и роликомаятниковой мельницы СМ-493

Показатель	Исходный материал					
	Вибромельница Palla-50U				Роликомаятниковая мельница СМ-493	
	Рекомендации фирмы		Результаты испытаний			
	Борное стекло	Полевой шпат	Борное стекло	Полевой шпат	Борное стекло	Полевой шпат
Производительность, кг/ч	500	700	600	800	1400	1700
Крупность готового продукта –0,04 мм, %	90	90	94–98	96–98	61	57
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	–	–	118	89	128	107

Таблица 2.111

Гранулометрический состав измельченных материалов на вибро- и роликомаятниковой мельницах

Размер ячейки сита, мкм	Остаток на ситах, %			
	после измельчения в вибромельнице (среднее из трех серий опыта)		после измельчения в ролико-маятниковой мельнице	
	Борное стекло	Полевой шпат	Борное стекло	Полевой шпат
160	–	–/5,6	0,05	0,2
125	Следы	–/5,7	0,3	0,4
100	0,03	–/7,9	0,8	1,4
80	0,04	–/11,6	2,3	4,1
63	0,18	–/11,0	0,1	7,7
50	0,70	–/16,3	18,3	14,4
40	2,40	2,2/16,9	16,6	14,5
40	97,15	97,8/25,0	61,55	57,3

Примечание. В числителе приведены значения готового материала, в знаменателе – возвратного материала.

тарные нормы (до 110 децибел), поэтому для ее промышленной эксплуатации требуется специальное шумопоглощающее укрытие.

Испытания показали пригодность указанного измельчителя для получения тонкоизмельченных компонентов керамических связок.

Определение намола металла при вибрационном измельчении полевого шпата авторы [126] проводили в лабораторной двухтрубной вибрационной мельнице, работающей с различным сочетанием мелющих тел (сталь ШХ, уралит) и футеровки (сталь Ст3, резина) до получения продукта крупностью минус 40 мкм, крупность исходного продукта — минус 2 мм, заполнение рабочего объема мелющими телами составляла 70 %. Загрузка мельницы: 50 кг шаров из стали ШХ диаметром 15 и 20 мм по ГОСТ 2424—78 или 25—28 кг тел

из уралитового цильпебса размером 15 × 15 и 25 × 25 мм по ГОСТ 2412–79 и 3 кг измельчаемого материала на каждую трубу.

Характеристика измельченных материалов приведена в табл. 2.112. Установлено, что готовый продукт получен через 1,5 ч измельчения при использовании в качестве мелющих тел стальных шаров и через 2,5 ч при использовании уралитового цильпебса независимо от материала футеровки.

Таблица 2.112

Характеристика измельченных материалов при вибрационном измельчении по [126]

Материал		Время измельчения, ч	Зерновой состав частиц, %				Медианный размер*, мкм	Содержание магнитного материала**, %
футеровок	мелющих тел		−20...+20 мкм	−20...+10 мкм	−10...+5 мкм	−5 мкм		
Сталь СТ3	Сталь ШХ	1,5	16,3	13,6	17,8	46,3	5,8	0,180
Резина			12,7	28,4	12,1	46,8	6,0	0,100
Сталь СТ3	Уралит	2,5	17,9	15,4	23,0	43,7	5,9	0,050
Резина			16,4	12,6	26,4	44,6	6,0	0,032

* Медианный размер частиц в пробе получен с интегральной кривой распределения (50 %).

** Содержание магнитного материала получено при уплотнении пробы в мерном стакане.

Анализ таблицы 2.112 показал следующее:

производительность мельницы при получении продукта заданной зернистости снижается в 1,6–1,7 раза при работе уралитовым цильпебсом вместо стальных шаров, так как при одинаковом заполнении объема рабочего барабана общая масса мелющих тел и масса отдельного тела из уралитового цильпебса, а следовательно, и сила удара примерно в два раза меньше;

намол металла снижается в 1,6–1,8 раза только за счет применения резиновой футеровки;

намол металла при применении металлических мелющих тел увеличивается в три-четыре раза по сравнению с намолом для измельчения уралитового цильпебса. Увеличение содержания магнитного материала примерно в пять-шесть раз наблюдается при применении футерованного металлом барабана и стальных мелющих тел против получаемого при использовании уралитового цильпебса и футерованного резиной барабана.

При получении продуктов одной и той же дисперсности только за счет металлической футеровки содержание магнитного материала увеличивается с 0,032 до 0,050 %, а за счет износа только мелющих тел — с 0,032 до 0,100 %. Расчеты показывают, что доля магнитного материала, попадающего в измель-

ченный продукт при использовании стальных мелющих тел, составляет 80 %, а за счет металлической футеровки — 20 %. Следовательно, для снижения намола металла при измельчении материалов без железистых включений в первую очередь следует применять специальные сорта износостойкой стали либо заменять металлические мелющие тела различными материалами, не вносящими железа в готовый продукт (уралитом, термокорундом и др.).

Таким образом, анализ состояния производства керамических связок позволяет сделать следующие выводы:

в отрасли применялся широкий ассортимент (16 видов) сырьевых материалов и 28 марок керамических связок. С одной стороны, этот фактор является положительным, так как расширяет сырьевую базу и приближает ее к заводам-изготовителям. С другой стороны, это приводит к получению разнородного по своим эксплуатационным характеристикам однотипного инструмента, выпускаемого различными заводами отрасли. Кроме того, нарушается стабильность качества инструмента;

создание некоторых марок связок на ряде абразивных заводов не оправдано. Они отличаются минимальным изменением шихтового состава, однако имеют другую марку;

зерновой состав связок имеет большой разброс в пределах отдельных фракций (например, фракция минус 5 мкм изменяется от 27 % (завод № 4) до 50 % (завод № 1)).

Таким образом, потребители получают нестабильный по качеству абразивный инструмент и не могут при замене завода-изготовителя сразу перейти на ту же характеристику инструмента, которую они получали раньше.

В связи с этим было принято решение об организации централизованного производства высококачественных связок в объеме общесоюзной отраслевой потребности, что позволило бы значительно улучшить эксплуатационные показатели абразивных инструментов и обеспечить стабильность их свойств.

Технологическая схема централизованного производства керамических связок

В основу схемы производства связок заложен высокий уровень автоматизации с использованием современного оборудования по переработке и тонкому измельчению компонентов связок с системой сепараторов и пульсирующих коллекторов, высокоточного дозирования и смешивания, беспыльной упаковки (с использованием оборудования японской фирмы Xosokava). Такая схема обеспечивает:

тонину помола компонентов — 90 % фракции минус 40 мкм;

точность дозирования компонентов при смешивании — 0,1–0,5 %;

технологические потери по переработке — не более 1 %;

содержание железистых примесей в готовой связке — не более 0,02–0,05 %;

предельную концентрацию пыли:

в рабочей зоне — не более 4 мг/м^3;

на границе санитарно-защитной зоны (на расстоянии 100 м от цеха) — не более 0,5 мг/м^3;

максимально допустимый уровень шума в рабочей зоне — 80 дБ.

Переработка компонентов и изготовление самих керамических связок на заводе производится на следующих технологических линиях:

линия переработки полевого шпата;

линия переработки огнеупорной глины и каолина;

линия переработки фритты;

линия переработки талька;

линия составления шихты, смешивания и упаковки.

Линия переработки полевого шпата

Схема линии переработки полевого шпата представлена на рис. 2.50. Полевой шпат крупностью частиц до 300 мм из бункера исходного материала *1* подается через колосниковый грохот *2* с размером щели 300 мм в приемный бункер *3*, откуда вибрационным питателем *4* — в щековую дробилку *5*, в которой происходит уменьшение размеров кусков до 25 мм. Затем дробленый мате-

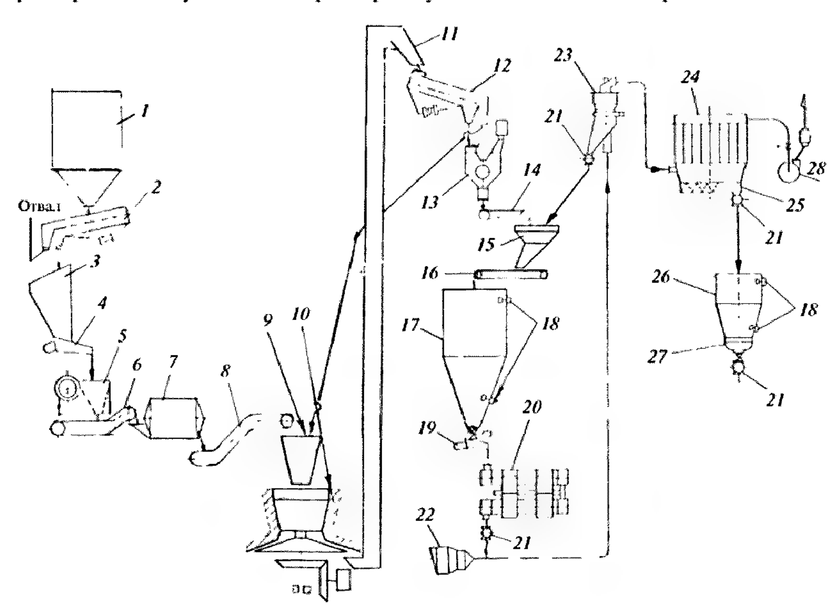


Рис. 2.50. Схема линии переработки полевого шпата:

1 — бункер исходного материала; *2* — колосниковый грохот; *3*, *17* — приемный бункер; *4* — вибрационный питатель; *5* — щековая дробилка; *6* — ленточный транспортер; *7* — сушильный барабан; *8* — ленточный транспортер; *9* — приемная воронка; *10* — конусная инерционная дробилка; *11* — элеватор; *12* — самобалансный грохот; *13* — магнитный сепаратор; *14*, *16* — транспортер; *15* — приемная воронка; *18* — указатель уровня; *19* — вибропитатель; *20* — вибромельница; *21* — шаровой затвор; *22* — паровой нагреватель; *23* — микронный сепаратор; *24* — пульсирующий коллектор; *25* — шнековый транспорт; *26* — бункер готового продукта; *27* — активатор; *28* — вентилятор

риал подается транспортером *6* на сушку в сушильный барабан *7*, где доводится до влажности 0,5 %. Сухой материал (минус 25,0 мм) посредством ленточного транспортера *8* поступает на мелкое дробление через приемную воронку *9* в конусную инерционную дробилку *10* модели КИД-600, работающую в замкнутом цикле с элеватором *11*, самобалансным грохотом *12* модели 272Гр и магнитным сепаратором *13* модели ЭВС-35/50. Надрешетный продукт крупностью плюс 2,0 мм возвращается на додрабливание, а подрешетный подается на машинное обогащение. Магнитный материал удаляется из процесса; обогащенный (немагнитный) продукт подается с помощью транспортера *14* через приемную воронку *15* и транспортер *16* в промежуточный бункер *17*, оборудованный указателями уровня *18*. Из промежуточного бункера *17* вибропитателем *19* немагнитный материал подается на измельчение в вибрационную двухтрубную мельницу *20* модели СН-65 (фирма Xosokava, Япония), работающую в замкнутом цикле с воздушным сепаратором *23* модели ZnS-080 (фирма Xosokava, Япония), который делит измельченный материал на два класса. Плюсовой возвращается через шаровой затвор *21* на доизмельчение, а минусовой (готовый) продукт поступает в пульсирующий коллектор *24*, откуда шнековым транспортером *25* через шаровой затвор *21* подается в бункер полевого шпата *26*, оборудованный указателями уровня *18*, активатором *27* и шаровым затвором *21*. Из бункера *26* материал далее поступает на линию смешивания.

Вибрационная двухтрубная мельница модели СН-65 (рис. 2.51) создана на основе технологического соглашения между фирмой Humboldt (Германия) и фирмой Chouxakoki (Япония).

Техническая характеристика мельницы СН-65

Емкость мелющих барабанов, л	2820
Мелющие тела	шары из специальной стали диаметром 20 и 25 мм
Масса стальных шаров, кг	10 400 (диаметром 20 мм — 50 %, диаметром 25 мм — 50 %)
Футеровка мельницы	высокопрочная сталь толщиной 12 мм
Мощность электрооборудования, кВт	132
Общая масса, включающая массу электродвигателя и основание мельницы, а также мелющих тел, кг	23 200
Производительность по полевому шпату, кг/ч	1300
Производительность по готовому продукту микронного сепаратора модели MS-5, кг/ч	650

Корпус мельницы помещен на резиновой прокладке, которая гасит вибрацию. Во время работы мельницы возникают шумы до 120 дБ, но путем установки звукоизоляционной аппаратуры шум можно уменьшить до 80 дБ. Эффективность измельчения практически не меняется при заполнении шарами объема мельницы до 30 %. При заполнении объема мельницы мелющими телами от 30 до 80 % эффективность измельчения увеличивается линейно и достигает максимума при заполнении шарами до 85 % объема. Добавление шаров диаметром 25 мм взамен изношенных производится периодически.

Пыль, образующаяся в процессе переработки от каждой отдельной операции, отбирается с помощью специальной системы и подается на пылеочистку в пульсирующие коллекторы. Уловленный продукт (пыль) возвращается в схему производства.

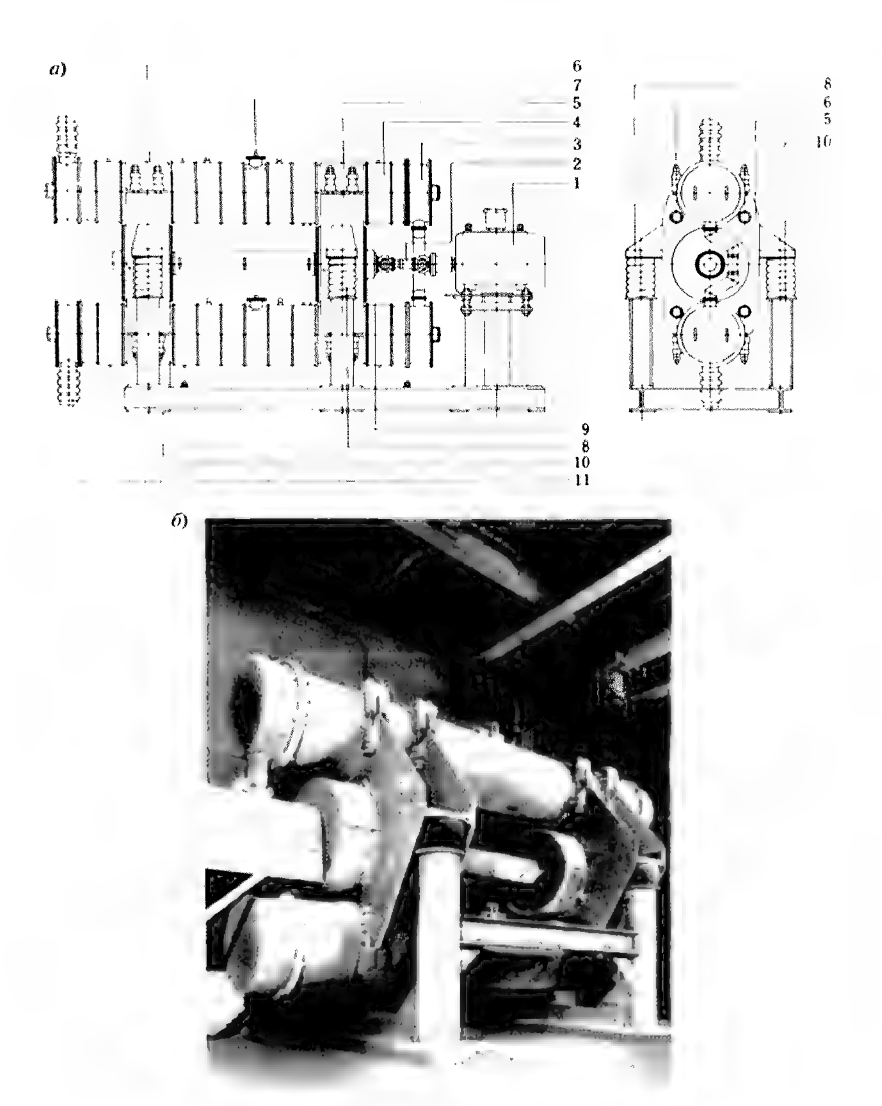


Рис. 2.51. Вибрационная двухтрубная мельница модели СН-65 непрерывного действия:

а — чертеж: *1* — электродвигатель; *2* — соединение; *3* — торцевая крышка; *4* — барабан; *5* — опора; *6* — кольцо для укрепления барабана; *7* — отверстие для шаров; *8* — резина для поглощения вибрации; *9* — подшипниковая коробка оси; *10* — основание корпуса; *11* — гибкая труба; *б* — общий вид

Общие потери при переработке полевого шпата на операциях грохочения, дробления, сушки, измельчения и магнитной сепарации составляют примерно 6,7 %.

Линия переработки глины (комового каолина)

Схема линии переработки огнеупорных материалов представлена на рис. 2.52. Исходный материал влажностью до 25 % и крупностью до 200 мм из бункера *1* через рыхлитель *2* подается шнековым питателем *3* с постоянной вибрацией в молотковую дробилку *5* фирмы Xosokava (Япония), которая применяется для одновременного дробления и сушки.

Сырой материал, поступающий в молотковую дробилку, получает динамическое воздействие, вызываемое вращением поворотных молотков, и измельчается. Одновременно в дробилку подается горячий воздух (температура 300—400 °С) от специальной печи *4* фирмы Xosokava (Япония), отапливаемой мазутом. При этом материал никогда не нагревается более чем до 120 °С.

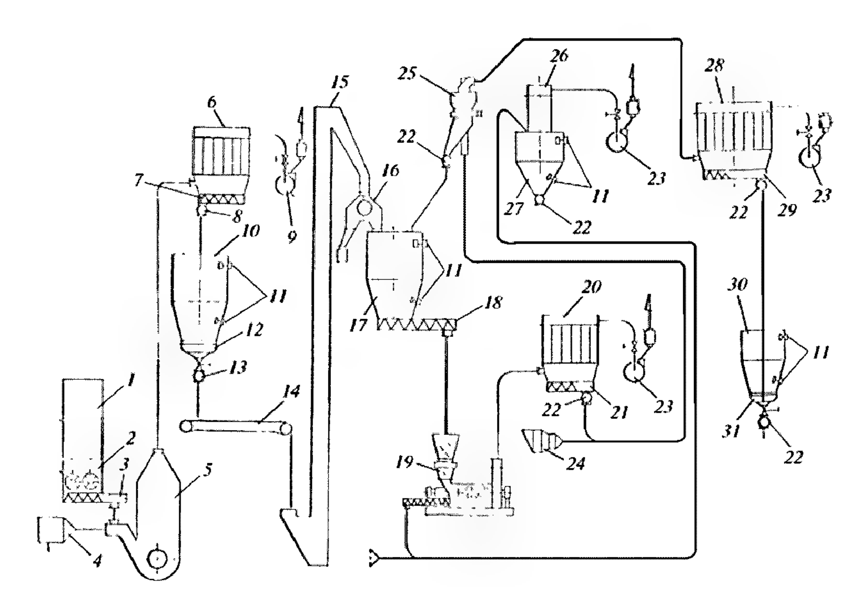


Рис. 2.52. Схема линии переработки глины (комового каолина):

1, 17 — расходный бункер; *2* — рыхлитель; *3* — шнековый питатель; *4* — специальная печь; *5* — молотковая дробилка; *6, 20, 28* — пульсирующий коллектор; *7, 21, 29* — шнековый транспортер; *8, 13, 22* — шаровой затвор; *9, 23* — вентилятор; *10* — промежуточный бункер; *11* — указатель уровня; *12* — активатор; *14* — ленточный транспортер; *15* — элеватор; *16* — магнитный сепаратор; *18* — шнековый конвейер; *19* — микронная мельница модели MF-20; *24* — паровой подогреватель; *25* — воздушный сепаратор; *26* — коллектор; *27* — бункер; *30* — бункер готового продукта; *31* — активатор

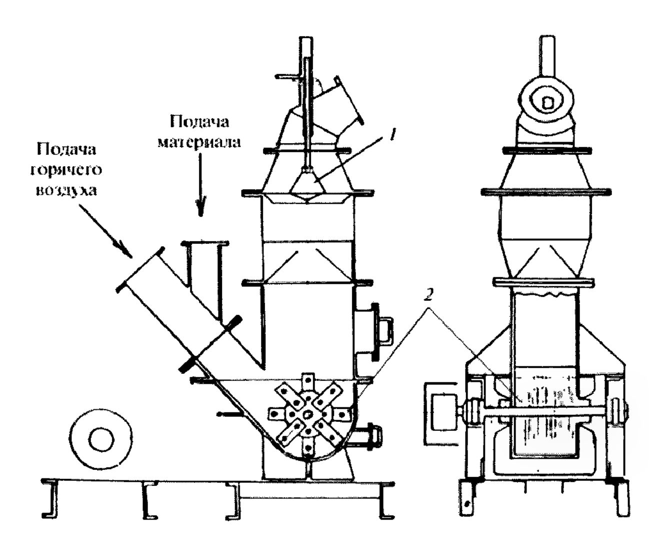


Рис. 2.53. Молотковая дробилка фирмы Xosokava:
1 – регулируемый конус; 2 – молотковая дробилка

Дробилка (рис. 2.53) состоит из двух частей — верхней и нижней. В нижней части расположена сама молотковая дробилка, а верхняя оснащена регулируемым конусом, обеспечивающим необходимую степень высушивания материала.

Высушенный измельченный материал захватывается восходящим потоком и выносится в верхнюю часть корпуса дробилки. За счет конуса, находящегося в верхней части, достигается ограничение воздушного потока и осуществляется классификация готового продукта. Более крупные частицы падают обратно в измельченную секцию для измельчения и высушивания, а мелкий высушенный продукт (минус 2,0 мм) с влажностью менее 2 % воздушным потоком выбрасывается из выпускного отверстия и попадает в пульсирующий коллектор.

Производительность дробилки по сухому порошку составляет 2600 кг/ч.

Для достижения максимальной производительности дробилки особую важность имеет постоянная скорость подачи материала. Еще более важным является необходимость поддержания постоянного воздушного потока во всей конструкции.

Простота и надежная конструкция обеспечивают требуемую степень измельчения регулированием скорости вращения ротора молотковой дробилки, а степень высушивания — регулирующим конусом.

Вынесенный воздушным потоком высушенный продукт (минус 2,0 мм) из выпускного отверстия дробилки направляется в пылесборник, которым служит пульсирующий коллектор *6* фирмы Xosokava (Япония).

Из пульсирующего коллектора дробленый материал шнековым транспортером *7* (см. рис. 2.52) через шаровой затвор *8* направляется в промежуточный бункер *10*, оборудованный указателями уровня *11*, активатором *12* с шаровым

затвором *13* и далее ленточным транспортером *14* и элеватором *15* на магнитный сепаратор *16*. Магнитный материал исключается из схемы, а обогащенный продукт ссыпается в расходный бункер *17*, оборудованный указателями уровня *11*, из которого шнековым конвейером *18* подается в приемную воронку микронной мельницы *19* модели MF-20 фирмы Xosokava (Япония), работающую в замкнутом цикле с воздушным сепаратором *25*, разделяющим измельченный материал на две фракции. Крупная фракция (плюс 40 мкм) возвращается на доизмельчение через шаровой затвор *22*, а мелкая (минус 40 мкм) подается через пульсирующий коллектор *28*, шнековым транспортером *29* через шаровой затвор *22* в бункер готового продукта *30*, оборудованный указателями уровня *11*, активатором *31* и шаровым затвором *22*, откуда далее поступает на линию смешивания керамических связок.

Мельница тонкого измельчения (рис. 2.54) модели MF-20 фирмы Xosokava (Япония) предназначена для измельчения сухой глины (влажность — не более 2 %, размеры исходного материала — не более 2 мм) и представляет собой установку ударного типа, в которую воздух подается с большой скоростью.

Краткая техническая характеристика мельницы модели MF-20

Мощность привода, кВт	150–200
Частота вращения ротора, об/мин	1450
Объем воздуха, м³/мин	90

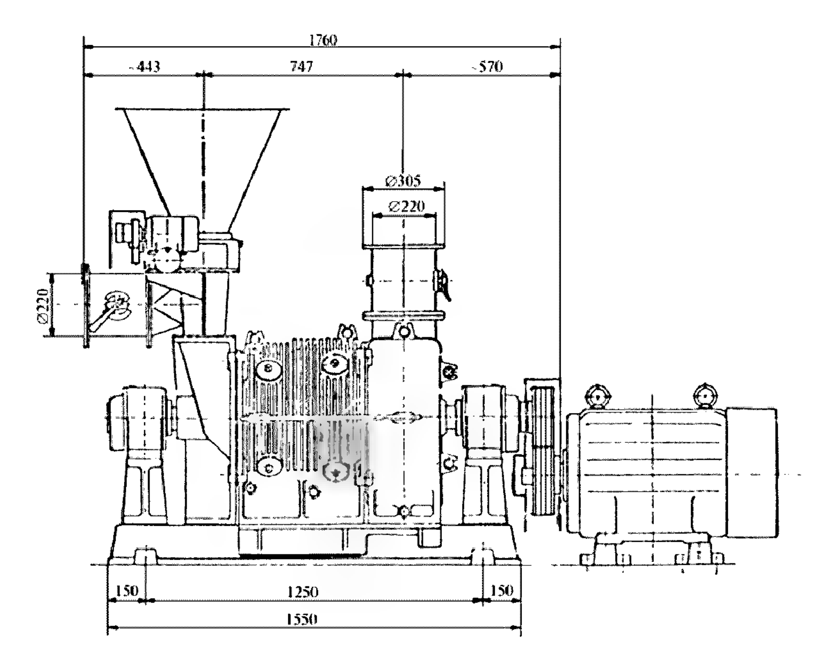


Рис. 2.54. Микронная дробилка модели MF-20 фирмы Xosokava

Масса, т 4,5
Производительность по глине, кг/ч 2000
Влажность выходного продукта .... 0,5–2,0 %
Производительность сепаратора модели MS-5 по готовому продукту
(глины), кг/ч 2000

Пыль, образующаяся в процессе переработки материала от каждой операции, отбирается с помощью специальной системы и подается на пылеочистку в пульсирующий коллектор. Уловленный материал возвращается в схему производства.

Линия переработки фритт (стекол)

Переработка фритт (стекол) производится по схеме переработки полевого шпата, за исключением операции крупного дробления (исходный материал сразу поступает на среднее дробление и далее по схеме, представленной на рис. 2.50).

Для измельчения фритты может также использоваться трехтрубная шаровая мельница конструкции Оргпроектцемента (Москва), представляющая собой трехкамерный измельчитель револьверного типа, в котором камеры-барабаны расположены симметрично под углом 120° относительно центральной оси и жестко соединены торцевыми крышками. По способу разгрузки данная установка относится к мельницам с центральной разгрузкой. Измельчаемый материал загружается через полую цапфу в торцевой крышке.

Последовательно соединенные между собой барабаны (если не учитывать кинематики мелющих тел и измельчаемого материала) позволяют в первом приближении отнести данную установку к трубным многокамерным мельницам тонкого помола.

Техническая характеристика трехтрубной шаровой мельницы

Внутренний диаметр барабана в свету, мм 1338
Рабочая длина барабана, мм 4830
Объем одного барабана, м^3 6,78
Объем мельницы, м^3 20,34
Частота вращения мельницы, об/мин 20,7
Мелющие тела $d \times L$ уралитовый цильпебс, мм .... 37×40
Общая масса мелющей нагрузки (шары из стали ШХ-15), кг 8145
Коэффициент заполнения барабана мельницы мелющей нагрузкой, % 25
Футеровка мельницы .... металлическая, гладкая
Производительность по готовому продукту минус 0,40 мкм, 90 %,
т/ч 0,600–0,660
Удельный расход электроэнергии, кВт/ч 60

При переходе с одной фритты на другую производится обязательная зачистка схемы.

Линия переработки талька

Линия переработки талька представлена на рис. 2.55. Исходный материал (поставляемый в мешках) с помощью растарочной машины высыпается из мешков и через загрузочную воронку *1* ковшовым элеватором *2* загружается в расходный бункер *3*, оборудованный указателями уровня *4*, из которого шнековым транспортером *5* через приемную воронку *6*, снабженную шнековым

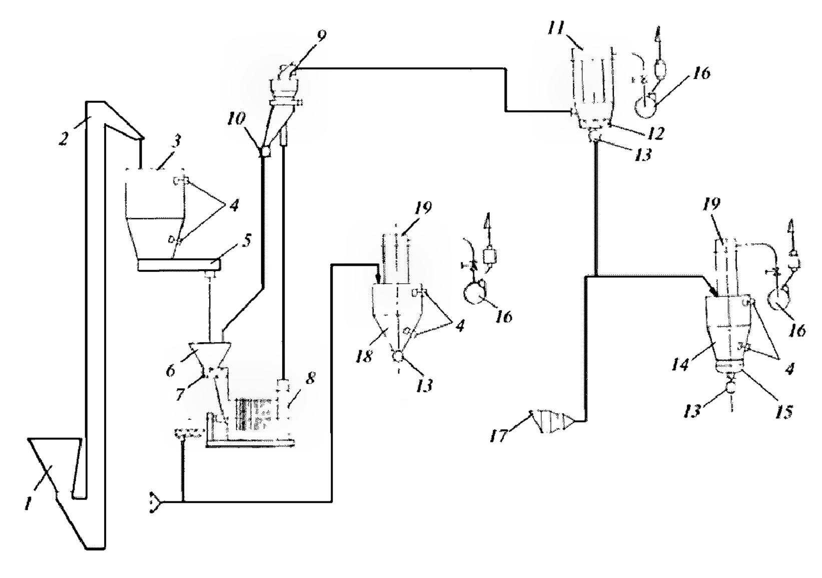


Рис. 2.55. Схема линии переработки талька:

1 — загрузочная воронка; *2* — ковшовый элеватор; *3* — расходный бункер; *4* — указатель уровня; *5, 12* — шнековый транспортер; *6* — приемная воронка; *7* — шнековый питатель; *8* — микронная мельница модели M502NC; *9* — микронный сепаратор; *10, 13* — шаровой затвор; *11* — пульсирующий коллектор; *14* — бункер готового продукта; *15* — активатор; *16* — вентилятор; *17* — паровой подогреватель; *18* — бункер готового продукта (пыль); *19* — коллектор

питателем *7*, подается на измельчение в микронную мельницу *8* модели M502NC, схема работы которой представлена на рис. 2.56, работающую в замкнутом цикле с микронным сепаратором *9* модели MS-5 (рис. 2.57). Крупный материал (плюс 40 мкм) возвращается через шаровой затвор *10* (см. рис. 2.55) на доизмельчение, а мелкий (минус 40 мкм) через пульсирующий коллектор *11* посредством шнекового транспортера *12*, через шаровой затвор *13* подается в бункер готового продукта *14*, оснащенного указателями уровня *4* и активатором *15* с шаровым затвором *13*. Активатор используется для поддержания продукта в состоянии, исключающем слеживание материала, и для более интенсивной разгрузки бункера. Из бункера готового продукта материал направляется на участок смешивания керамических связок.

Мельница модели M502NC (см. рис. 2.56) представляет собой двухступенчатый агрегат, предназначенный для получения порошков 40 мкм без использования сит или решеток. В данной конструкции трение, растирание, скалывание и удар — основные способы разрушения — действуют объединенно, обеспечивая тем самым высокую производительность и эффективность измельчения материала до крупности частиц от 140 до 2 мкм. Конечный продукт имеет очень узкий диапазон размеров частиц, т. е. эффект переизмельчения отсут-

ствует. Конструкция мельницы предусматривает классификацию материалов путем выделения крупных частиц. Хотя мельница может работать без сепаратора, предусматривается ее установка с сортировочным механизмом (сепаратором) и пульсирующим коллектором.

Основные технические параметры мельницы модели М502NC

Производительность, кг/ч 500
Мощность электродвигателя, кВт 22
Скорость вращения ротора, об/мин 2400
Требуемая площадь, включая установку пульсирующего коллектора, м .... 5,0 × 2,5 × 6,5

Линии переработки криолита и волластонита

Исходный материал в мешках подается на линию растарки, где с помощью специальной машины высыпается из мешков и транспортируется в промежуточный бункер, затем питателем подается в вибрационную мельницу модели М400 отечественного производства, работающую в замкнутом цикле с микронным сепаратором. Крупный остаток (фракция плюс 40 мкм) возвращается на доизмельчение, а мелкий (минус 40 мкм) — в бункер готовой продукции.

Во всех линиях переработки исходных материалов керамических связок для разделения частиц по крупности и обеспыливания применяются воздушные сепараторы и пульсирующие коллекторы фирмы Xosokava (Япония), не имеющие отечественных аналогов.

Диапазон разделения на сепараторе — от 140 до 5 мкм с эффективностью работы от 60 до 90 %. Конструкция сепаратора основана на гидродинамике и законе Стокса. Это прецизионная установка, которая значительно уменьшает высокую стоимость получения тонкозернистых порошков без использования сит.

Схематично воздушный сепаратор представлен на рис. 2.57.

Сортируемый материал поступает в микронный сепаратор по трубе *8* и, поднимаясь по внутренней подающей трубе *4* с регулированной длиной, проходит направляющую воронку *11* и попадает на сортировочный ротор *3*, приводимый во вращение от двигателя *1* с регулируемой скоростью. Частицы расчетного размера выносятся через промежутки между лопастями ротора *3* и по выходной трубе *2* поступают в соответствующий сборник. Крупный материал осаждается и выгружается через канал *10*. В процессе осаждения поток с частицами подвергается сильнейшей турбулизации, вызываемой внутренней трубой (перегородкой) *7* и дополнительным воздухом, подаваемым по каналу *6*. Такое воздействие вызывает дополнительное очищение крупных частиц от прилипших к ним более мелких частиц. Спускная труба *9* для крупных частиц может быть оснащена поворотным клапаном или простым подвижным наконечником с заслонкой.

Диапазон разделения сепаратора можно расширить регулированием воздушного потока.

Характеристика микронного сепаратора MS4

Скорость вращения ротора, об/мин:
максимальная 1160
рабочая 580–660
Производительность по готовому продукту, кг/ч 450

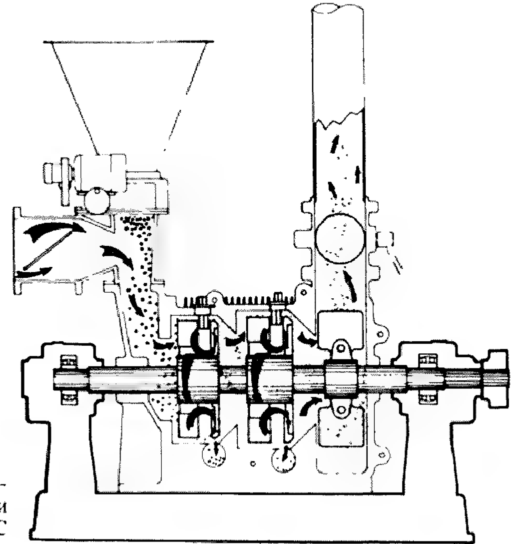


Рис. 2.56. Схема работы супер-микронной мельницы модели M502NC

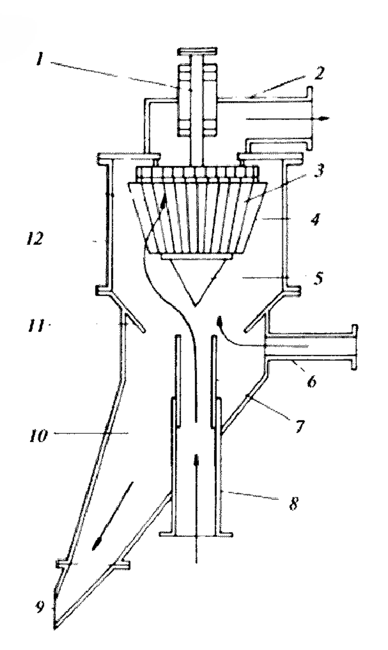


Рис. 2.57. Схема воздушного сепаратора:

1 — двигатель; *2* — выходная труба; *3* — лопатки ротора; *4* — сортировочный ротор; *5, 11* — направляющая воронка; *6* — канал дополнительного воздуха; *7* — внутренняя подающая труба; *8* — подающая труба; *9* — спускная труба; *10* — выгрузной канал; *12* — корпус сепаратора

Пульсирующий коллектор (схема и принцип работы которого показаны на рис. 2.58) — полностью автоматический самоочищающийся рукавный фильтр — без внутренних движущихся частей — представляет собой набор цилиндрических фильтров *5* из синтетической ткани, расположенных в пыленепроницаемом кожухе *7*. В кожух подается запыленный воздух, а из внутреннего объема фильтров отсасывается чистый воздух. Пыль собирается в фильтрах *5*, периодическая очистка которых осуществляется мгновенными выбросами воздуха через специальные трубки Вентури *6* в верхней части фильтровальных цилиндров. За один такой "пневмоудар" очищается часть общей фильтрующей поверхности таким образом, что из коллектора идет непрерывный поток собранной пыли через шаровой затвор *8*.

Сжатый воздух под давлением 0,9 МПа подается компрессором *1* через диафрагмовый клапан *4*, который управляется от таймера *2* через управляющий клапан *3*; все фильтры одного ряда очищаются одновременно. В качестве фильтровальной ткани применяется синтетический войлок (полиэфирный или специальный нейлоновый) как наиболее эффективный и термостойкий материал.

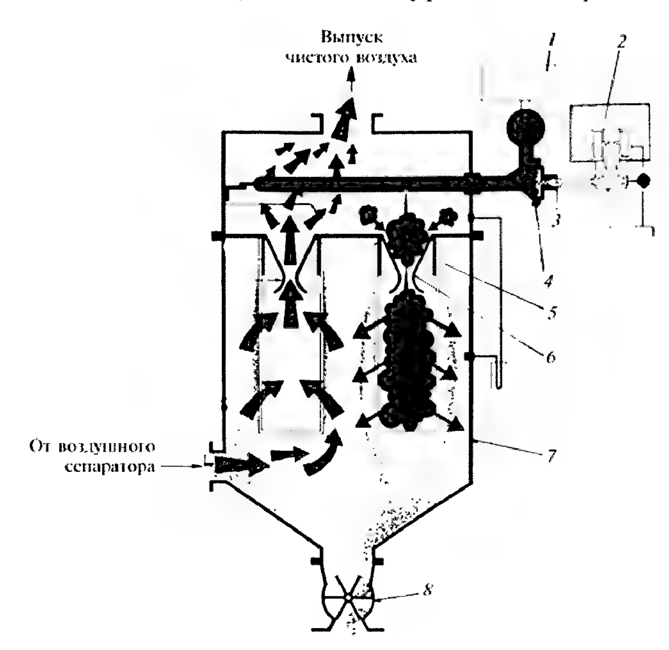


Рис. 2.58. Схема и принцип работы пульсирующего коллектора:

1 — компрессор; *2* — таймер; *3* — управляющий клапан; *4* — диафрагмовый клапан; *5* — цилиндрический фильтр; *6* — трубки Вентури; *7* — пыленепроницаемый кожух; *8* — шаровой затвор

Войлочный рукав в отличие от волнистого фильтра (тканая основа рукава) работает более эффективно, так как сквозь спутанную текстуру войлока не проходят даже частицы субмикронных размеров; в то же время "выстрелянный" под давлением воздух при очистке фильтров проходит сквозь войлок значительно легче, чем через волнистую ткань. Фильтрующий слой, образованный пылью в теле войлочного фильтра, снижает до минимума перепад давления, обеспечивая высокую и равномерную производительность коллектора.

В каждом отдельном случае производительность фильтра определяется физико-химическими свойствами фильтруемого газа или воздуха и твердых частиц. Ориентировочно войлочные фильтровальные элементы обеспечивают производительность рукавных фильтров до 5 м^3/мин на 1 м^2 площади фильтров. Фильтр работает эффективно при подаче воздуха с запыленностью более 2000 г/м^3 и обычно не требует первичного фильтровального оборудования.

Составление шихты, смешивание компонентов связок, контроль и упаковка

Составление шихты для каждой марки керамической связки производится строго по рецептуре.

Из бункеров измельченных компонентов каждой линии переработки материалы через весовые дозаторы подаются в загрузочную воронку и далее в микронный смеситель периодического действия модели Nauta, включающийся автоматически по окончании загрузки. Выгрузка готовой связки осуществляется транспортерами, работающими с элеваторами в один из бункеров, предназначенных для данной марки связки. На рис. 2.59 представлен микронный смеситель, применяющийся для быстрого, тщательного и равномерного смешивания различных тонкодисперсных материалов. Внутри смесителя вращается "спиральный агитатор" (шнек) *3* вокруг своей оси, одновременно совершая круговое движение по периферии конического объема корпуса *4* с помощью рычага *2*, получающего вращение от привода *1*. Нижний конец шнека закреплен в подшипниковом узле *6*. В этом смесителе материал равномерно перемешивается без расслоения. Время смешивания 40 мин. Производительность микронного смесителя 5 т/ч.

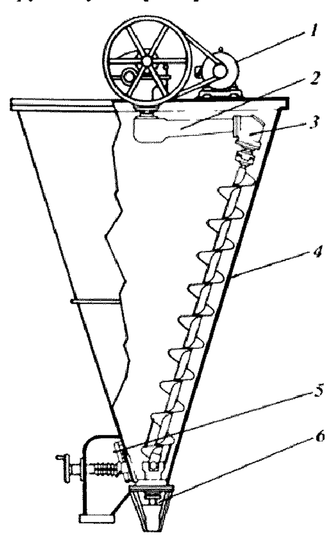


Рис. 2.59. Микронный смеситель модели Nauta:
1 — привод смесителя; *2* — рычаг; *3* — "спиральный агитатор" (шнек); *4* — корпус смесителя; *5* — выпускной клапан; *6* — подшипниковый узел

Готовая связка из смесителя выгружается через клапан *5* в один из расходных бункеров, предназначенных для данной марки связки. Описанный процесс повторяется автоматически и управляется с пуль-

та. Готовая связка разгружается из бункеров в промежуточную воронку, откуда продукт направляется в упаковочную машину, имеющую дозировочный узел, так что взвешивание и накопление транспортных емкостей производится автоматически. Точность дозирования связки составляет 1,5–2,0 %. Контроль качества керамических связок, упаковка и маркировка осуществляются по ТУ2-036-984–86 и ТУ 3989-014-05748371–99.

Общие потери компонентов связок при их переработке составляют, мас. %: полевой шпат — 4,0; глина огнеупорная — 27,8; каолин комовой — 25,8; фритта — 4,0; тальк — 0,5; криолит — 0,5; волластонит — 0,5.

2.3.2. Мокрый способ приготовления керамических связок

Технологическая схема производства связок мокрым способом представлена на рис. 2.60 [127].

Процесс производства связок мокрым способом состоит из следующих операций:

складирование и приемка исходных сырьевых материалов;
подготовка сырьевых материалов;
составление шихты и изготовление связок в виде шликера;
получение связок из шликера методом сушки распылением;
упаковка, хранение, транспортировка связки;
контроль готовой продукции;
техника безопасности.

Складирование и приемка сырьевых материалов. Глина огнеупорная, полевой шпат, каолин выгружаются и складируются отдельно в отсеках склада. Борсиликатная фритта хранится в специальных контейнерах, а тальк, криолит, волластонит — в мешках в молотом виде. Все материалы хранятся в крытом помещении. В производство допускаются материалы, качество которых соответствует требованиям ГОСТов и технических условий.

Подготовка сырьевых материалов

Линия переработки полевого шпата. Со склада полевой шпат подается на грубое дробление. Крупные куски полевого шпата дробятся на щековой дробилке до кусков размером не более 100 мм. Затем материал поступает на среднее дробление, которое производится на малой щековой дробилке до кусков крупностью не более 25 мм, и направляется в промежуточный бункер, из которого по рукаву самотеком подается в конусно-инерционную дробилку модели КИД-300, в которой измельчается до размеров не более 2 мм, проходит грохочение и направляется в расходный бункер.

Линия переработки боросиликатной фритты. Боросиликатная фритта со склада в специальных контейнерах подается на участок измельчения и высыпается в бункер конусно-инерционной дробилки КИД-300, где измельчается до крупности кусков не более 2 мм, проходит грохочение и направляется в расходный бункер боросиликатной фритты.

Линия переработки глины и каолина. Глинистые материалы предварительно измельчают на глинорезных машинах различных конструкций [13], подвергают

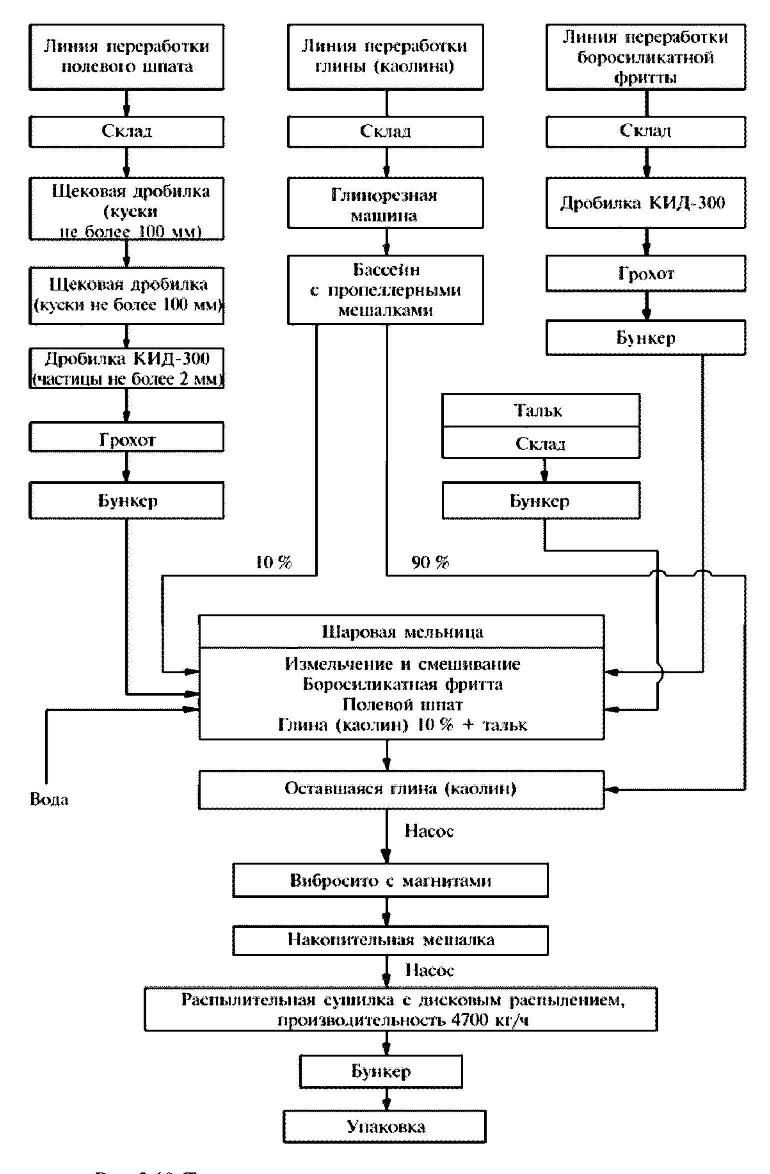


Рис. 2.60. Технологическая схема производства керамических связок мокрым способом

сортировке и распускают в бассейнах емкостью примерно 4 м^3, снабженных пропеллерными мешалками типа СМ-489А либо горизонтально-лопастными мешалками (рис. 2.61). Роспуск глинистых материалов производится в течение 180 мин до получения однородной консистенции суспензии (плотность по пикнометру 1,26–1,28 г/см^3), которая при непрерывном перемешивании подается из бассейна в подмельничную емкость в количестве 90 % от общей массы глины (каолина), а 10 % глинистой суспензии поступает в шаровую мельницу.

Составление шихты и изготовление связки в виде шликера. Пример состава шихты связки К20 с учетом технологических потерь (в зависимости от оборудования и технологической дисциплины) и количество необходимых сырьевых материалов для изготовления 1 т связки приведены в табл. 2.113. Компоненты связки: полевой шпат, фритта, тальк, сухой каолин — взвешиваются на весах любой конструкции с погрешностью взвешивания ±0,5 %. Взвешенные материалы высыпаются в приемный бункер шаровой мельницы. Измельчение компонентов можно производить двумя способами.

При *первом способе* перед загрузкой материалов в мельницу подается вода, затем материал и шары. Соотношение материал : шары : вода — 1 : 1 : 0,5. Перед каждым циклом работы мельницы производится добавка мелющих тел в количестве не менее 60 кг для компенсации потери их веса вследствие износа. В качестве мелющих тел используют цилиндрики из высокоглиноземистой массы марки Г-37 диаметром 25–55 мм и высотой 45–50 мм.

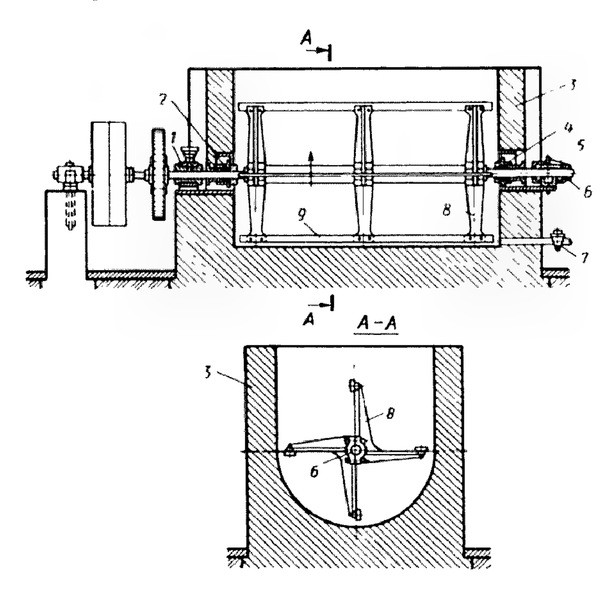


Рис. 2.61. Горизонтальная лопастная мешалка:

1, 5 — подшипники; *2, 4* — сальниковые буксы; *3* — резервуар; *6* — вал; *7* — пробковый кран; *8* — крестовина; *9* — лопасти

Таблица 2.113

Количество сырьевых материалов для изготовления 1 т связки марки К20

Шихтовый состав связки	Содержание компонентов в связке, % (кг/т)	Потери компонентов при изготовлении связки, % (кг)	Количество материалов на 1 т связки
Полевой шпат	35 (350)	8,7 (24,5)	379,5
Каолин	40 (400)	10,0 (40,0)	440,0
Боросодержащая фритта	20 (50)	14 (28)	228,0
Тальк	5 (50)	10 (5,0)	55,0

Изготовление связки начинается с измельчения боросиликатной фритты. Взвешенная фритта загружается в шаровую мельницу периодического действия и измельчается совместно с каолином (10 % от общей массы каолина) в течение 2–3 ч. Затем добавляется полевой шпат и производится совместный помол в течение 3–6 ч до остатка на сите № 063 не более 1 %, затем подается тальк и помол продолжается еще в течение 3 ч. Общее время измельчения и взвешивания 8–12 ч. По окончании процесса производится контроль тонины помола.

При измельчении и смешивании всех компонентов шаровую мельницу останавливают и открывают загрузочное отверстие (для удаления конденсата) через каждые три часа работы мельницы на 2–3 ч.

Готовая суспензия из шаровой мельницы сливается в подмельничную емкость, предварительно наполненную суспензией пластичных материалов (глины или каолина) при непрерывной работе пропеллерной мешалки. Количество глины (каолина) при этом составляет 90 % от рецептуры связки.

После роспуска глинистые материалы подвергаются ситовому и магнитному обогащению. Ситовое обогащение осуществляется при пропускании суспензии через сито с сеткой № 063 и вибросито с двумя обечайками, на которых натянута сетка № 01, в результате чего суспензия освобождается от крупных включений.

Для магнитной сепарации суспензии используют ферромагнитные сепараторы лоткового типа 600-5, типа СМ-488, ФОЛ-5 конструкции ГИКИ и др. Потребляемая мощность ферромагнитных сепараторов лоткового типа 0,5–0,8 кВт.

Представляет интерес магнитный сепаратор ВИМС (Германия), работающий с автоматическими регулируемыми циклами и с частотой 10–15 циклов в минуту. Каждый цикл включает три стадии: захват и отделение частиц минералов с магнитными свойствами на профилированных плитах в магнитном поле; очистка отделенных минералов пульсирующей струей воды; удаление магнитных минералов с профилированных плит при снижении интенсивности магнитного поля и одновременном усилении струи воды. При потреблении мощности до 0,0008 кВт/с, силе тока 65 А и напряженности магнитного поля $1{,}43 \cdot 10^6$ А/м возможно снижение содержания Fe_2O_3 в каолине до 0,15–0,2 %. Для магнитной очистки суспензий при сливе в сборники смеси также широко используются гребенчатые переносные магниты, магнитные плиты и др.

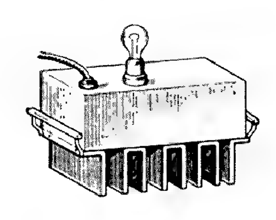


Рис. 2.62. Переносной электромагнит

Переносные электромагниты (рис. 2.62) имеют электромагнитные катушки, помещенные в металлическую коробку из листовой стали или латуни. К полюсам электромагнита прикреплены полюсные наконечники, которые выходят за пределы коробки и образуют металлическую гребенку. Керамическая смесь, протекающая по спусковому желобу через гребенку электромагнита, разделяется на мелкие струйки, со всех сторон омывающие наконечники, которые извлекают из смеси магнитные частицы. Электромагнит вверху снабжен контрольной электрической лампочкой, которая автоматически выключается, если он не работает. Гребенку периодически очищают от металлических частиц. Производительность переносного магнита 1130—14000 л/ч. Для более эффективного удаления магнитных частиц из смеси в желобе устанавливают несколько электромагнитных коробок.

Шликер, очищенный от железосодержащих примесей и загрязнений, поступает в расходную емкость.

По *второму способу* изготовление связки производится совместным измельчением компонентов в две загрузки. В первую очередь подается вода, затем пластичные материалы (каолин, глина) в количестве 10 % от их общей массы, затем фритта, полевой шпат и шары. Соотношение материалов компоненты связки : шары : вода — 1 : 1,3 : 0,7. После измельчения в течение 2—3 ч подаются вторично вода, остаток пластичных материалов (90 %), тальк, криолит, волластонит и др.

Общее время измельчения 12—15 ч. По окончании измельчения проверяется тонина помола. Готовый шликер сливается из шаровой мельницы в бассейн при непрерывной работе пропеллерной мешалки с одновременным обогащением по способу 1 и передается на сушку.

Получение связок из шликера методом сушки распылением. Сушка распылением — это превращение жидкости или суспензии в сухой порошок в течение одной рабочей операции. Суспензия распыляется центрифугированием или при помощи давления, и брызги мелких капель немедленно приходят в соприкосновение с потоком горячего воздуха.

Конструкция распылительной сушилки и условия эксплуатации выбираются в каждом отдельном случае в соответствии с особенностями продукта, т. е. содержания в нем влаги, плотности его массы, размера его частиц. Благодаря большому разнообразию физических особенностей шликера необходимо произвести тщательную оценку системы сушки, чтобы создать оптимальные условия, которые необходимы для данного производства. Поскольку поток воздуха имеет спиралеобразное направление, возможен выпуск почти всей массы продукта со дна камеры.

Получение пресс-порошка керамической связки производится в распылительной сушилке с дисковым распылением, например, конструкции фирмы Niro-Atomizer (Дания) (рис. 2.63). При центробежном распылении вращающийся лопастной диск, имеющий износоустойчивые вставки, распыляет сус-

пензию и посылает капельки радиально в поток горячего воздуха, который поступает сверху через потолочный распылитель воздушной среды (рис. 2.64).

Режим сушки шликера:

начальная температура теплоносителя — 550 °С;

температура отходящих газов — 90 °С;

разрежение в сушильной камере — 15 мм вод. ст.

Шликер из расходной емкости насосом нагнетается в резервуар подачи шликера, откуда самотеком через питательный клапан, имеющий дистанционное управление, подается на распылительный диск и далее по схеме дискового распыления. Влажность получаемого пресс-порошка (связки) 1 %.

Готовый пресс-порошок самотеком высыпается через резиновый откидной клапан на транспортную систему (ленточный конвейер-элеватор) и поступает в бункер. Перед поступлением в элеватор порошок проходит через сетку 1,25 для удаления комков слипшихся гранул.

Тонкие фракции порошка, осевшие в циклоне, поступают в общую систему пылеулавливания, собираются в бункер и в дальнейшем используются как возвратные отходы.

Характеристика основного и вспомогательного оборудования для распыления шликера представлена в табл. 2.114.

Получение пресс-порошка керамических связок может производиться на распылительных сушилках других моделей и конструкций, как отечественных, так и зарубежных, например с сопловым распылением (рис. 2.65 и 2.66). Сопловый распылитель расположен в нижней части камеры и направлен прямо вверх. Это устройство дает фонтанообразные брызги, которые встречаются с горячим воздухом, поступающим в сушильную камеру через распылитель воздушной струи [128].

После изготовления связки производится контроль ее качества по ТУ 3989-014-05748371—99.

Связки упаковывают в тару, обеспечивающую герметичность и сохранность при транспортировке.

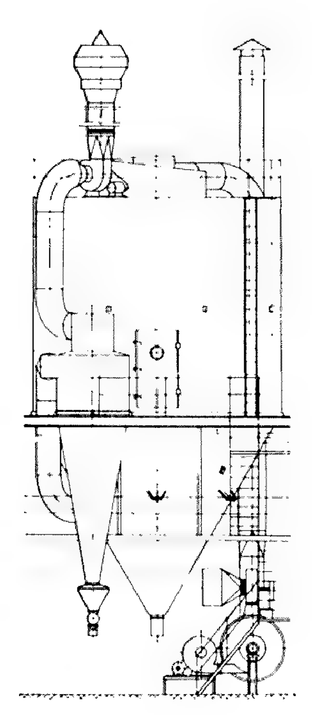


Рис. 2.63. Общий вид распылительной сушилки фирмы Niro-Atomizer

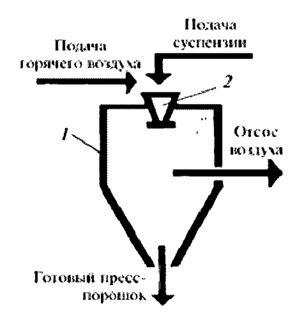


Рис. 2.64. Схема сушки с дисковым распылением:
1 — корпус сушки;
2 — дисковый распылитель

Таблица 2.114

Техническая характеристика основного и вспомогательного оборудования для распыления шликера

Наименование оборудования	Тип, модель, марка	Техническая характеристика
Распылительная сушилка с дисковым распылителем	Фирма Niro-Atomizer	Высота сушильной камеры (общая) – 11,940 м, в том числе цилиндрическая часть – 6,292 м; диаметр сушильной камеры – 7,040 м; производительность сушилки (максимально): а) по испаренной влаге – 2500 кг/ч; б) по сухому порошку – 4700 кг/ч при влажности шликера 31 %
Насос для подачи суспензии	Mohno-насос 2NE50 винтовой	Производительность – 6 $м^3$
Циклон	–	–
Скруббер	–	–
Элеватор ковшовый	Econ-Lift	Производительность – 3000 кг/ч
Бункер (2 шт.)	–	Объем – 28 $м^3$

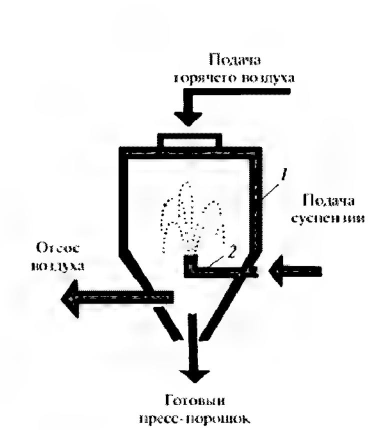


Рис. 2.65. Схема сушки с сопловым распылением:

1 – корпус сушилки; *2* – сопловый распылитель

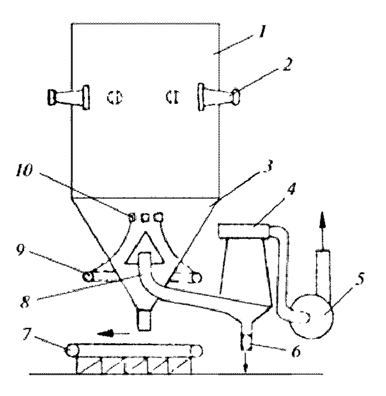


Рис. 2.66. Схема распылительной сушилки конструкции НИИстройкерамики:

1 — цилиндрическая башня; *2* — газовые горелки; *3* – конусное днище; *4* – циклон; *5* — дымосос; *6* — шибер; *7* — конвейер; *8* – всасывающий патрубок; *9* — шликеропровод; *10* — механические форсунки

Техника безопасности. К работе на распылительном сушиле допускаются лица, обученные безопасным методам работы, прошедшие инструктаж по технике безопасности на рабочем месте и ознакомленные с инструкцией по эксплуатации распылительной сушилки.

2.4. Клеящие вещества формовочных смесей (временные связующие)

Одной из важнейших характеристик при производстве абразивного инструмента на керамической связке является механическая прочность свежезаформованных и высушенных изделий, исключающая нарушение сплошности (расслоение) заформованного изделия при извлечении его из пресс-формы, при установке на сушильные плиты, при транспортировке и установке их на печные вагонетки. При этом 50 % брака от общего объема производства инструмента объясняется недостаточной механической прочностью изделий как в сыром, так и в высушенном состоянии.

Для придания прочности свежезаформованным и высушенным абразивным заготовкам в формовочную смесь вводятся клеящие вещества, обладающие связующей способностью, которые в процессе обжига изделий либо выгорают полностью, либо частично переходят в керамическую связку.

Согласно современным представлениям клеящие вещества могут быть разделены на органические клеи, клеи-пасты, клеи-растворы, клеи-цементы [129].

К органическим клеям относят декстрин, бакелит, арабогалактан и некоторые другие соединения. Их клеящая способность объясняется обычно наличием в них свободных функциональных групп и иногда способностью к полимеризации.

К клеям-пастам следует отнести глины и литейные шликера. Механизм их адгезии заключается в действии водородных связей, образующихся в присутствии воды при гидратации базальной поверхности тетраэдров SiO_4, находящихся на открытой стороне пакета кристалла глинистого материала [130].

Наиболее типичными представителями клеев-связок являются жидкое стекло и различные виды фосфатных связующих. Они представляют собой молекулярные растворы, близкие к насыщению. При высыхании такие связующие превращаются в дисперсную систему с выделением твердой фазы [131, 132].

Наиболее прочные изделия можно получить при использовании клеев-цементов, твердение которых происходит в результате химической реакции между порошкообразным (отвердителем) и жидким связующим [133]. Химическая активность такого связующего обеспечивает высокую прочность формуемых полуфабрикатов, причем скорость взаимодействия может регулироваться активностью отвердителя. Однако такие формовочные смеси, как правило, являются нетехнологичными ввиду невозможности длительного хранения.

Кроме придания прочности абразивному полуфабрикату клеящие вещества должны обладать способностью смачивать минеральные частицы формовочной смеси, иметь минимальную адгезию в поверхности металлических пресс-форм, выгорать в процессе обжига абразивного изделия без золы или с минимальным ее содержанием, отсутствием токсичности как в самих клеящих веществах, так и в продуктах их разложения.

2.4.1. Характеристика клеящих веществ

В отечественной абразивной промышленности до настоящего времени в качестве клеящих добавок наиболее часто применяются натриевое стекло и декстрин. В некоторых случаях формовочная смесь готовится с применением декстрина в порошке, а в качестве увлажнителя добавляется вода.

Жидкое стекло является водным раствором силикат-глыбы. Последняя представляет собой твердый аморфный сплав растворимого стекла общего состава $R_2O{\cdot}m{\cdot}SiO_2$, где R — натрий или калий, а m — число молекул SiO_2, приходящихся на одну молекулу щелочных оксидов.

Жидкое стекло используется как клеящий увлажнитель абразивно-керамических смесей; оно представляет собой сиропообразную вязкую жидкость, обладающую высокими клеящими и цементирующими свойствами.

В зависимости от того, какая силикат-глыба была использована для приготовления жидкого стекла, оно подразделяется на содовое, содово-сульфатное и сульфатное. Содовое жидкое стекло — это раствор содовой силикат-глыбы, полученной сплавлением смеси кварцевого песка с карбонатом (содой). Содово-сульфатное жидкое стекло — раствор силикат-глыбы, полученной сплавлением смеси кварцевого песка с содой и сульфатом натрия. Сульфатное жидкое стекло — это раствор силикат-глыбы, полученной сплавлением смеси кварцевого песка с сульфатом натрия. Сульфатное жидкое стекло растворяется в воде с бóльшим трудом, чем содовое. В связи с этим для приготовления жидкого стекла используют содовую силикат-глыбу или содово-сульфатное составляющее.

Основными техническими характеристиками силикат-глыбы, применяемой для приготовления жидкого стекла, являются его модуль и химический состав (ГОСТ 13079–93).

Под модулем M понимают отношение числа грамм-молекул SiO_2 к числу грамм-молекул Na_2O:

$$M = \frac{A}{D}1{,}032,$$

где A — процентное содержание SiO_2 в силикат-глыбе; D — процентное содержание Na_2O в силикат-глыбе; 1,032 — отношение молекулярного веса оксида натрия к молекулярному весу кремнезема.

В табл. 2.115 приведены значения модуля M и химические составы содовой и содово-сульфатной глыб, характеризующиеся модулем от 2 до 3,4 и плотно-

Таблица 2.115

Химический состав и значения модуля содовой и содово-сульфатной глыб

Вид силикат-глыбы	Модуль	Химический состав, мас. %				
		SiO_2	Na_2O	R_2O_3	SO_3	S
Содовая	2,4–3,5	71,5–76,5	22,5–27,5	0,6	–	0,12
Содово-сульфатная	2,7–3,0	71,5–73,5	25,3–27,3	1,0	–	0,50

стью 1,36–1,50 г/см^3. Для приготовления формовочных смесей применяется жидкое стекло с модулем от 2 до 3 и плотностью от 1,48 до 1,50 г/см^3.

По физико-химическим показателям жидкое стекло должно соответствовать нормам, указанным в табл. 2.116.

Нормы по химическому составу и силикатному модулю устанавливаются потребителем при заказе жидкого стекла в пределах, указанных в настоящем стандарте.

Плотность жидкого стекла определяется ареометром для жидкостей тяжелее воды и является важнейшим физическим параметром, который контролируется при изготовлении формовочных смесей. Плотность жидкого стекла зависит от его химического состава и от общего содержания растворенного твердого вещества. С повышением концентрации раствора плотность увеличивается.

Варка стекла производится в автоклаве емкостью 1,7 м^3, мощность привода 3 кВт, и n = 9,8 об/мин с использованием рецептуры состава: силикат-глыба — 440–460 кг и вода — 500–530 л.

Технологическая схема варки стекла приведена на рис. 2.67.

В автоклав *9* открытием крана *2* из мерной емкости *7* заливается половина указанного в рецептуре количества воды (250–265 л), затем ссыпается в автоклав предварительно взвешенное количество силикат-глыбы (410–460 кг) и заливается вторая половина воды. После этого крышка *6* люка автоклава закрывается, включается привод автоклава на вращение, открывается вентиль *3* паропровода подачи пара. Давление пара на подаче из теплоцентра (манометр *4*) должно быть 2,2–2,3 атм. По достижении этого давления открывается вентиль *2* подачи пара в автоклав. В процессе варки в зависимости от показаний манометра *5* выбирается режим варки: при давлении пара в автоклаве 2,8–

Таблица 2.116

Физико-химические показатели жидкого стекла

Показатель	Нормы для разных видов жидкого стекла	
	Содовая	Содово-сульфатная
Внешний вид	Густая жидкость желтого цвета без механических включений, видимых невооруженным глазом	Густая жидкость от желтого до коричневого цвета без механических включений, видимых невооруженным глазом
Плотность, г/см^3	1,36–1,50	1,43–1,50
Содержание кремнезема, %	31–35	28,5–29,5
Содержание оксида железа и оксида алюминия, %, не менее	0,25	0,40
Содержание оксида кальция, %, не более	0,20	0,25
Содержание серного ангидрида в пересчете на серу, %, не более	0,06	0,40
Содержание оксида натрия, %	10–12	10–11
Силикатный модуль	2,65–3,40	2,65–3,00

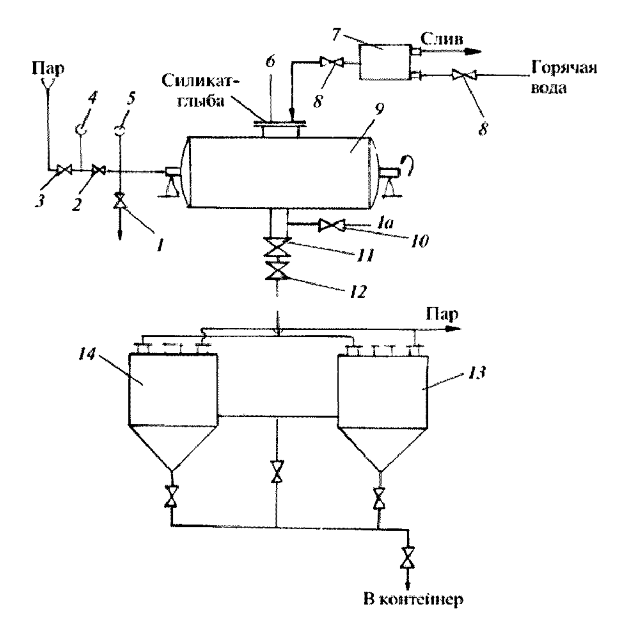


Рис. 2.67. Технологическая схема варки стекла:

1 — силовой штуцер стравливания пара из автоклава; *2* — вентиль подачи пара в автоклав; *3* — вентиль подачи пара в систему; *4* — манометр давления пара; *5* — манометр давления пара в автоклаве; *6* — крышка автоклава; *7* — мерная емкость; *8* — кран горячей воды; *9* — автоклав; *10* — штуцер пробоотбора; *11*, *12* — сливные вентили; *13*, *14* — расходные емкости

3,4 атм (низкий режим) время варки 3,4–4 ч; при давлении 3,5–4,5 атм (высокий режим) время варки 2,5–3,0 ч.

Варка стекла производится при температуре 90 °С, в процессе варки измеряется плотность при 90, 50 и 20 °С. По достижении плотности 1,46–1,48 г/см^3 на момент отбора пробы через штуцер пробоотбора при 20 °С (за 30 мин до окончания варки) переходят к сливу жидкого стекла в расходные емкости. В случае низких плотностей (менее 1,46 г/см^3) варка продолжается по указанным выше режимам.

После окончания варки автоклав останавливается, открываются сливные вентили *11* и *12* и жидкое стекло перекачивается в расходные емкости *13* и *14*, пока давление в автоклаве не снизится до 0 атм; вентили сливной системы перекрываются и автоклав отсоединяется от сливной системы. Остаточный пар стравливается из автоклава через силовой штуцер *10*, после чего открывается люк автоклава. Если не намечается последующей варки, в автоклав заливается 250 л воды.

В случае использования жидкого стекла с модулем ниже 2,6 производят корректировку состава жидкого стекла добавлением едкого натра (табл. 2.117).

Необходимо знать, что при использовании жидкого стекла плотностью менее 1,48 г/см^3 прочность сырца резко уменьшается, а при использовании жидкого стекла с плотностью более 1,50 г/см^3, в связи с большой вязкостью, увлажнение формовочной смеси затрудняется.

Декстрин — продукт гидролиза крахмала, представляющий собой смесь углеводов. Выпускается по ГОСТ 6034–74, согласно которому влажность декстрина должна быть не более 5 %, содержание золы не более 0,6 %, кислотное число 40–50 КОН, растворимость в воде при 20 °С на сухое вещество 60–90 % для разных марок. Наличие большого числа гидроксильных групп в полимерных цепях декстрина обеспечивает ему водорастворимость, а относительно высокая молекулярная масса (90000–110000) обусловливает высокую вязкость растворов, образующих при высыхании прочную пленку.

Декстрин — порошкообразное вещество без запаха и в водном растворе нетоксичен, полностью растворяется в воде с получением вязкого раствора, обладающего высокой клеящей способностью. Растворы стабильны, не имеют склонности к синерезису. В сухом виде декстрин хорошо сохраняется, а во влажном состоянии подвержен развитию плесени, что приводит к снижению его клеящей способности.

Декстрин в абразивных смесях способствует образованию относительно сыпучей подвижной системы. При формовке абразивных изделий получается относительно прочный сырец. При этом декстрин хорошо совмещается с жидким силикатом натрия.

Декстрин как органическое вещество не имеет химического взаимодействия с минеральными компонентами абразивной смеси в процессах смешения, формования или обжига. Не оказывает коррозийного действия на металл пресс-формы и не раздражает кожу рук рабочего.

При обжиге декстрин выгорает полностью, образуя преимущественно CO_2 и H_2O при избытке воздуха. (В восстановительном пламени, однако, образуется некоторое количество СО.)

Клей декстриновый неводостойкий, но это не является недостатком, так как в конечном итоге он сгорает при обжиге керамического инструмента. Углеводы, подобные декстрину, в условиях обжига и сжигания практически не коксуются и не дают каких-либо ароматических продуктов вроде бензола или фенола.

Таблица 2.117

Количество едкого натра для корректировки жидкого стекла до модуля 2,6 в процессе варки

Масса силикатной глыбы, кг	Масса NaOH, необходимая для корректировки жидкого стекла, кг, при модуле							
	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
100	9,9	8,9	7,7	6,6	5,4	4,2	2,8	1,5

Примечание. Расчет выполнен для едкого натра марки ТД (ГОСТ 2263–79) с массовой долей гидроксида натрия не менее 94 %.

Поскольку декстрин гидрофилен, он должен сочетаться с гидрофильными минеральными компонентами, например с глинами. Система декстрин—вода—глина однородна. Она, собственно, и дает адгезионную пленку на зернах корунда или карбида кремния благодаря поверхностному взаимодействию гидроксилов с корундом, карбидом кремния и силикатами.

Варка декстрина производится следующим образом: в емкость заливают воду примерно на 1/3 высоты и включают подогрев. После того как вода нагреется до 30–40 °C (температура определяется термометром стеклянным жидкостным по ГОСТ 28498–90), в бак загружают сухой декстрин из мешков.

Рецептура для приготовления раствора декстрина представлена в табл. 2.118.

После полного растворения декстрина в емкость добавляется недостающее количество воды до заданного уровня. Варка декстрина производится при нагревании раствора до $T = 80\pm5$ °C при постоянном перемешивании до полного исчезновения комочков. Приготовленный, охлажденный до комнатной температуры декстрин фильтруется через сетки № 3, 4 от сгустков, пленок и посторонних примесей. Для проверки плотности используется ареометр АОН-1120 1180 (ГОСТ 18481–81). Раствор декстрина выливают в емкость диаметром 45 мм, высотой 400 мм и проверяют плотность.

Ориентировочное время варки декстрина 40–60 мин. Срок хранения декстрина в зимнее время — пять суток, в летнее время — трое суток.

После варки вся аппаратура зачищается.

Несмотря на положительные свойства декстрина, необходимо строго контролировать его количество в рецептуре формовочных смесей — не более 45–50 % от объема связки. При выпуске твердых кругов СТ3–ВТ применение декстрина не рекомендуется [134].

В табл. 2.119, 2.120 представлены прочностные свойства образцов инструмента зернистостью 50–16 при использовании в рецептуре жидкого стекла и сухого декстрина и зернистостью 10–М40 при применении сухого декстрина и воды. Как видно из табл. 2.119, 2.120, образцы имеют низкую механическую прочность сырца зернистостью 50–16 при твердости М3 (0,020–0,030 МПа) и крайне низкую прочность как сырца, так и высушенных образцов мелкозернистого инструмента, равную 0,010–0,040 и 0,06–0,3 МПа для твердостей М3–СМ2 соответственно. Это объясняется более открытой структурой при изготовлении мелкозернистого инструмента и отсутствием в рецепте жидкого стекла, которое значительно упрочняет изделие после сушки.

Таблица 2.118

Рецептура приготовления раствора декстрина

Наименование компонента	Содержание компонентов в растворах разной концентрации, % (кг)		
	30 %-ный раствор	40 %-ный раствор	50 %-ный раствор
Сухой декстрин	30 (15)	40 (20)	50 (23)
Вода	70 (35)	60 (30)	50 (22)
Допустимая величина плотности раствора	1,12±0,01	1,17±0,01	1,21±0,01

Таблица 2.119

Физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого марки 25А на связке К5

Зернистость материала	Компоненты смеси, мас. ч.			Структура	Заданная твердость	Прочность образцов на изгиб, МПа			Полученная твердость	
	Связка	Жидкое стекло	Сухой декстрин			свежезаформованных	высушенных	обожженных	Глубина лунки, мм (P = 1,5 атм)	Твердость
50	7,15	3,2	1,5	6	М3	0,020	0,39	24,8	4,6	СМ1
	14,15	4,3	1,0	6	С2	0,030	0,64	29,7	2,0	СТ1
	17,40	5,8	1,0	5	СТ2	0,045	2,06	31,5	1,6	СТ3
40	7,45	3,1	2,2	6	М3	0,030	0,72	28,0	4,9	СМ1
	12,55	4,3	1,0	6	С2	0,035	1,04	31,7	2,9	СТ1
	15,30	5,7	0,75	5	СТ2	0,070	2,05	35,1	2,0	СТ3
25	5,80	3,0	2,0	7	М3	0,020	1,13	36,4	6,6	М3
	13,50	5,2	0,8	7	С2	0,025	2,05	39,0	3,2	СТ1
	17,30	6,2	0,5	6	СТ2	0,070	1,85	40,6	2,6	СТ3
16	7,50	4,0	1,5	7	М3	0,030	0,77	38,5	5,7	СМ1
	16,10	6,0	0,5	7	С2	0,070	2,62	45,3	3,3	СТ1
	19,90	6,7	0,5	6	СТ2	0,110	3,18	44,4	2,2	Т1

Таблица 2.120

Физико-механические свойства образцов из электрокорундов белого марки 25А и легированного электрокорунда марки 91А на связке К5

Зернистость материала	Компоненты смеси, мас. ч.			Структура	Заданная твердость	Прочность образцов на изгиб, МПа			Полученная твердость	
	Связка	Жидкое стекло	Сухой декстрин			свежезаформованных	высушенных	обожженных	Глубина лунки, мм ($P = 1,5$ атм)	Твердость
25А10	11,0	3,2	1,5	8	М3	0,010	0,060	24,6	7,6	М3
	15,0	2,9	1,8	8	СМ2	0,020	0,080	33,0	5,6	СМ1
	17,0	2,8	2,0	8	С1	0,025	0,130	46,5	5,1	С1
	21,5	2,6	2,4	8	СТ1	0,035	0,330	53,0	3,8	СТ1
25А5	16,0	2,9	2,2	9	М3	0,015	0,120	30,0	5,9	М3
	20,0	2,5	2,5	9	СМ2	0,020	0,210	37,0	5,2	СМ1
	23,5	2,3	2,9	9	С1	0,030	0,300	52,0	3,9	С2
	31,5	2,1	3,5	9	СТ1	0,040	0,370	60,0	3,3	СТ1
25М40	15,0	2,7	3,1	10	М3	0,015	0,210	25,5	7,4	М3
	20,0	2,4	3,5	10	СМ2	0,030	0,230	38,0	5,4	СМ1
	24,5	2,1	3,9	11	С1	0,035	0,270	48,0	4,8	СМ2
	30,5	1,7	4,3	11	СТ1	0,040	0,290	55,0	4,1	С2
91А10	11,0	3,2	1,5	8	М3	0,005	0,050	22,5	6,7	М3
	15,0	2,9	1,8	8	СМ2	0,010	0,070	30,8	5,3	СМ1
	17,0	2,8	2,0	8	С1	0,015	0,190	36,0	4,7	С1
	21,5	2,6	2,4	8	СТ1	0,025	0,276	41,8	4,1	С2

Поиск новых временных связующих велся в трех направлениях: замена пищевого продукта — декстрина; поиск новых веществ, которые могли бы обеспечить более высокую механическую прочность и в то же время увеличивали бы сыпучесть формовочных смесей; разработка способов упрочнения заготовок кругов.

А.П. Скрыльниковой и В.Г. Воано были получены положительные результаты по замене декстрина на лигносульфонат марок БП и АК-1, физико-механические свойства сырых высушенных образцов и их твердость были аналогичны свойствам образцов, изготовленных с применением жидкого стекла с сухим декстрином и указанных выше.

Результаты работы авторов по применению сульфитцеллюлозной барды не могут быть в настоящее время использованы, так как технология сульфитцеллюлозного производства за прошедший период изменилась.

Попытка замены декстрина на сульфитцеллюлозную барду и лигносульфонат марки КБТ, мочевины, фосфата алюминия (однозамещенного) и сапропеля не дали положительных результатов.

Работы ВолжскВНИИАШа по применению в абразивных смесях из карбида кремния вместо декстрина этилсиликата в виде водного раствора, смолы сосновой, эпоксидной смолы ЭД-5, канифоли, универсального поливинилбутирального клея также не привели к положительным результатам.

А.Н. Лукницкий, исходя из соображения, что свойства веществ, заменяющих декстрин, должны приближаться к свойствам декстрина, предложил в качестве его замены следующие материалы (табл. 2.121). Под его руководством вместо декстрина были использованы различные образцы концентратов и порошкообразной сульфитцеллюлозной бражки (марок СДБ, КПБ) — продукта целлюлозно-бумажной промышленности, которые не дали положительных результатов для инструмента из электрокорундовых материалов, но был получен положительный эффект при изготовлении абразивного инструмента из карбида кремния (прочность сырых и высушенных образцов возросла на 20–30 %). При этом жидкие концентраты с 50 %-ным содержанием сухого

Таблица 2.121

Вещества, подлежащие исследованию в качестве заменителей декстрина (по А.Н. Лукницкому)

Наименование вещества	Химический тип	Источник получения	Исходное сырье
Арабогалактан	Полисахариды – химические аналоги декстрина	Целлюлозная промышленность	Древисина лиственницы
Целлодекстрины	–	Гидролизная промышленность	Отходы древесины хвойных и лиственных пород
Пелиозы	–	То же	Гидролизат целлюлозы
Гидрол	–	"	Отходы производства технической целлюлозы

Наименование вещества	Химический тип	Источник получения	Исходное сырье
Отходы производства лимонной кислоты (концентрат)	Смешанные продукты углеводного характера	Пищевая прмышленность	Свекловичный жом
Метилцеллюлоза	Эфиры и эстеры целлюлозы	Химическая промышленность	Хлопковый линтер
Корбоксилотил целлюлозы	–	То же	"
Карбомидные клеи разных марок	Синтетические консенсационные смолы (клеи)	"	Мочевина, формалин
Концентрат сульфит-целлюлозной бражки	–	Целлюлозная промышленность	Отходы производства сульфитной целлюлозы
Сухой концентрат сульфит-целлюлозной бражки	–	То же	То же
Препараты стеблей шток-розы	Растительные камеди	Образцы А.Н. Бин, СССР	Растительное сырье
Камедь трагаканта	–	То же	"

вещества могут быть использованы в качестве увлажнителя, а сухие порошкообразные — в виде клеящей добавки.

Указанным автором исследовались несколько типов карбамидных клеев (КС50, КС22, КС23). После введения клея смесь сразу смешивалась, и из нее формовались образцы. Свежезаформованные образцы имели низкую прочность (0,007–0,019 МПа), но при выдержке на рабочей плите в течение порядка 30 мин прочность возрастала до 0,090–0,465 МПа, а после сушки — до 2,74–4,54 МПа, что обусловлено процессом поликонденсации мочевиноформальдегидной смолы. Скорость процесса, обусловливающего твердение карбамидного клея, определяется также дозировкой ускорителя. Однако применение карбамидных клеев связано с выделением формальдегида при обжиге абразивного инструмента и с разработкой специальных условий смешивания масс и формования.

Позднее (1990–1992 гг.) А.А. Куров, используя лигносульфонат порошкообразный марки КБП Солекамского ЦБК по ТУ 04-225–79 и жидкий лигносульфонат марки В на алюминиевой основе, выпускаемый Балахинским ЦБК по ТУ 13-0281036-05–89, получил положительные результаты при замене жидкого стекла и сухого декстрина на электрокорундовых материалах (пример — табл. 2.122). Как видно из табл. 2.122, прочность на изгиб свежезаформованных и высушенных образцов либо практически находится на том же уровне, что и образцов, изготовленных на жидком стекле с декстрином, либо повышается на 20–40 %.

При использовании концентратов вместо жидкого стекла твердость образцов уменьшается на 1–1,5 степени, т. е. количество связки для получения заданной твердости необходимо увеличить на 1–2 вес. ч.

Оптимальной концентрацией лигносульфоната автор считает 40–50 %, так как уменьшение концентрации приводит к снижению прочности обожженного образца.

Таблица 2.122

Физико-механические свойства образцов из белого электрокорунда на керамической связке К5 структуры 7

Характеристика образца	Шихтовый состав абразивной смеси на 100 мас. доли зерна, мас. %						Объемный вес смеси, г/см³	Свежезаформованные образцы			Высушенные образцы		Обожженные образцы	
	Связка	Сухой декстрин	Жидкое стекло	Вода	Жидкий лигносульфонат	Сухой лигносульфонат		Влажность W, %	Прочность на изгиб σ, МПа	Осыпаемость n, %	Прочность на изгиб σ, МПа	Осыпаемость n, %	Прочность на изгиб σ, МПа	Твердость
Контрольные образцы														
25А25 СМ1	8,8	1,5	4,20	0,40	–	–	2,17	2,06	0,039	5,9	0,946	4,9	29,12	СМ1
Замена сухого декстрина сухим лигносульфонатом														
25А25 СМ1	8,8	–	4,2	0,4	–	1,5	2,17	1,83	0,035	9,0	0,234	13,2	28,75	СМ1
Замена жидкого стекла и сухого декстрина на жидкий и сухой лигносульфонат														
25А25 СМ	8,8	–	–	0,8	42 (50 %)	3,6	2,17	2,09	0,030	4,0	0,893	7,2	22,42	М2
Влияние концентрации используемого жидкого лигносульфоната														
25А25 СМ1	8,8	–	–	–	4,2 (40 %)	3,75	2,17	2,10	0,032	4,2	0,845	6,8	11,94	М3
25А25 СМ1	8,8	–	–	–	4,2 (30 %)	3,75	2,17	2,35	0,040	1,5	1,141	3,1	11,67	М3
25А25 СМ1	8,8	–	–	–	4,2 (20 %)	3,75	2,17	2,69	0,021	0,9	1,263	2,2	10,44	ВМ2
25А25	8,8	–	–	–	4,2 (50 %)	3,75	2,21	2,10	0,045	0,71	1,402	2,16	28,52	М3
25А25	10,8	–	–	–	4,4 (50 %)	3,75	2,26	2,08	0,051	0,84	1,252	1,60	32,70	СМ1
25А25	12,8	–	–	–	4,6 (50 %)	3,75	2,30	2,21	0,048	0,69	1,342	1,66	37,60	С1
25А25	16,8	–	–	–	4,8 (50 %)	3,75	2,37	2,94	0,048	0,23	2,229	1,38	39,12	С2
25А25	20,8	–	–	–	5,0 (50 %)	3,75	2,49	2,65	0,072	1,05	2,133	1,34	41,29	СТ2

Положительные результаты работы А.А. Курова были подтверждены авторами [135].

Раствор и порошкообразная сульфитно-целлюлозная бражка были внедрены на одном из заводов отрасли при изготовлении абразивного инструмента из монокорунда на связке К5 ($\sigma_{сыр}$ = 0,07 МПа) и карбида кремния на связке К3 ($\sigma_{сыр}$ = 0,100–0,130 МПа), что выше на 30–40 % по сравнению с инструментом, изготовленным по общепринятой рецептуре.

Таким образом, комбинация жидкого и сухого лигносульфонатов обеспечивает необходимую прочность сырца и заменяет пищевой продукт — декстрин, однако при этом:

инструмент из белого электрокорунда приобретает сероватый оттенок; для восстановления белого цвета инструмента требуется сильная окислительная среда в печи;

влияние на цвет инструмента из нормального электрокорунда и карбида кремния менее значительно;

приготовление абразивных смесей с лигносульфонатом требует высокой культуры производства, так как длительное хранение готовых абразивных смесей невозможно (слеживаются);

необходимо наличие постоянного поставщика лигносульфоната определенного качества (марок) в связи с тем, что лигносульфонаты разных целлюлозно-бумажных комбинатов имеют различный химический состав и плотность;

необходима переработка (корректировка) рецептуры.

Применение *арабиногалактана* в качестве заменителя декстрина предложено авторами в работе [136]. Арабиногалактан представляет собой неочищенный клеевой порошок светло-коричневого цвета, мелкодисперсный, без неприятного запаха, нетоксичен, растворим в холодной и горячей воде, его растворы обладают хорошими клеящими свойствами, в процессе обжига выгорает без остатка и без выделения вредных газов. Арабиногалактан получают из водного экстракта древесины лиственницы и высушивают на распылительной сушилке или другим способом.

Состав и физико-химические свойства клеевого порошка неочищенного арабиногалактана (НАГ):

полимер, осажденный спиртом (арабогалактан) — 77,2 %;

растворимые в спирте компоненты (моносахариды, фенольные соединения, флаваноиды, танниды) — 22,8 %;

зола — 11,8 %;

влажность — 5,4 %;

редуцирующие вещества (РВ) — 9,3 %;

средний молекулярный вес — 200000–250000;

относительная вязкость 1 %-ного водного раствора— 1,059 сантипуаза (сП);

вязкость 50 %-ного водного раствора — 420 сП (1 сП — сотая доля 1 П);

сопротивление скалыванию клеевого шва (при употреблении 60 %-ного водного раствора) — 12,6 кг;

цвет — светло-коричневый.

Результаты сравнительных испытаний клеевого порошка НАГ и декстрина в качестве временного связующего при изготовлении абразивного инструмента на керамической связке приведены в табл. 2.123.

Таблица 2.123

Результаты сравнительных испытаний клеевого порошка НАГ и декстрина в качестве временного связующего

№ п/п	Содержание временного связующего, вес. ч.	Предел прочности, МПа			Твердость по ГОСТ 18118–79
		при изгибе		при растяжении образцов после сжатия	
		свежезаформованного сырца	высушенных образцов		
1	2,0 вес. ч. декстрина сухого	0,025	0,3	14,1	СМ1
2	2,0 вес. ч. порошка НАГ	0,036	0,4	–	СМ1
3	4,0 вес. ч. порошка НАГ	0,049	1,2	14,5	СМ1
4	1,0 вес. ч. декстрина сухого +2,0 вес. ч. порошка НАГ	0,031	0,6	–	СМ1

Как следует из полученных данных, при замене декстрина равным количеством клеевого порошка НАГ (опыты 1 и 2) получено увеличение прочности сырца на 40 %. Также на 40 % увеличилась прочность высушенных образцов, прочность обожженных образцов, твердость при замене декстрина порошком НАГ практически не изменилась, что указывает на отсутствие взаимодействия клеевого порошка НАГ со связкой. При замене же только половины декстрина удвоенным количеством НАГ прочность высушенных образцов возрастает в два раза (опыт 4). При замене всего количества декстрина удвоенным количеством НАГ прочность высушенных образцов возрастает в четыре раза (опыт 3); при этом липкости массы не наблюдается.

Для повышения прочности сырого и высушенного образцов авторы [137] предлагают модифицирование щелочных связок, увлажненных жидким стеклом, например бурой, вызывающей интенсивную коагуляцию жидкого стекла, которая сопровождается повышением его вяжущих и прочностных свойств. Прочность на изгиб свежезаформованных образцов из такой формовочной смеси существенно возрастает и составляет 0,089–0,250 МПа.

Таблица 2.124

Свойства формовочной смеси и образцов

Характеристика образца	Сыпучесть смеси, г/с	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа	
		свежезаформованного образца	высушенного образца
25А40 СМ2 6 К5, 25А25 СМ2 6 К5 с добавкой 0,5 % H_3BO_3	83 161	0,0320 0,0460	35,60 35,80
25А25 СМ2 7 К5, 25А25 СМ2 7 К5 с добавкой 0,8 % H_3BO_3	72 148	0,0360 0,0500	38,00 38,45
25А12 СТ2 7 К5, 25А12 СТ2 7 К5 с добавкой 1,5 % B_2O_3	65 123	0,0420 0,0500	42,50 41,30

В целях увеличения сыпучести формовочной смеси при увеличении механической прочности свежезаформованного сырца авторы [138] вводили в формовочную смесь от 0,5 до 1,5 % борной кислоты, которая при введении в приготовленную смесь адсорбирует воду из жидкого стекла, последняя коагулирует, увеличивая вязкость. В результате сыпучесть смеси увеличивается вдвое, механическая прочность сырых образцов возрастает до 40 %, прочность обожженных не изменяется (табл. 2.124).

Применение парафиновых эмульсий
в качестве клеящих веществ формовочных смесей

Известно, что ведущие зарубежные абразивные фирмы не используют в качестве клеящих веществ жидкий силикат, а для этих целей широко применяют парафиновые эмульсии, которые обеспечивают необходимую сыпучесть абразивной смеси и позволяют с равной плотностью укладывать ее во вращающуюся пресс-форму. Например, канадская фирма "Джи энд Би" рекомендует использовать парафиновую эмульсию 67 %-ной концентрации марки "Мобил-Сер-А" фирмы "Мобил-Ойл", которую нельзя подвергать чрезмерному нагреву (свыше 30 °С) и не следует охлаждать до температуры замерзания. При употреблении парафиновая эмульсия разбавляется водой в соотношении 1 : 3. Срок ее хранения — несколько месяцев. Свойства эмульсии: вязкость при температуре 25 °С — 1200–1800 сП, температура плавления — 55 °С, твердость при замере на универсальном пенетрометре при 25 °С и нагрузке 102,5, приложенной в течение 5 с, — в пределах от 13 до 19. Для материала зернистостью выше 220 меш (М63) восковая эмульсия не применяется — рекомендуется применение поливинилового спирта.

Таких парафиновых эмульсий отечественная промышленность не выпускала и не выпускает. Свойства опытных образцов, разработанных в России, представлены в табл. 2.125. В табл. 2.126 представлены физико-механические свойства образцов, изготовленных на парафиновой эмульсии по сравнению с образцами на жидком силикате.

Таблица 2.125

Физико-химические показатели качества парафиновой эмульсии

Наименование показателей	Значение показателей	
	Образец № 1	Образец № 2
Внешний вид	Однородная вязкая жидкость белого цвета	Белая текучая масса
Содержание сухого вещества, мас. %	50	50
Кинетическая вязкость при 20 °С, Па·с	400–600 (вискозиметр Освальда)	519 (вискозиметр "Реотест–2")
Плотность при 20 °С, г/см^3	0,932	0,954
Водородный показатель pH	6,7–7,0	7,3
Поверхностное натяжение при 82 °С, дин/см	44,7	–
Температура плавления, °С	–	51

Таблица 2.126

Сравнительные данные исследований физико-механических свойств формовочных смесей и образцов 25А40 на связке К5

Наименование показателя	Номер рецепта			
	1	2	3	4
Шлифзерно 25А40 (Россия)	100	100	100	100
Шлифзерно 46 меш (Канада)	–	–	100	–
Вид связки	К5	К5	К5	К5
Количество связки	11,3	12,7	12,7	12,7
Количество воды	0,1	–	–	–
Сухой декстрин (Россия)	1,2	1,7	–	–
Сухой декстрин (Канада)	–	–	1,7	–
Жидкое стекло	4,6	–	–	–
Парафиновая 50 %-ная эмульсия (Канада)	–	2,8	2,8	2,8 (Россия, образец № 2)
Структура	7	7	7	7
Плотность, г/см^3	2,22	2,22	2,22	2,22
Влажность смеси, %	2,37	1,64	1,57	1,80
Сыпучесть смеси, г/с	88,0	98,0	98,0	96,0
Угол естественного откоса, град	27	24	20	20
Осыпаемость, %	4,6	2,1	2,1	2,4
Прочность сырца, МПа	0,043	0,026	0,026	0,020
Прочность высушенного образца, МПа	1,33	0,40	0,43	0,40
Предел прочности на изгиб обожженного образца, МПа	35,0	36,0	34,0	32,0
Твердость по пескоструйному прибору	СМ2	СМ2	СМ1	СМ1

Анализ данных табл. 2.126 показывает: влажность смеси при использовании парафиновой эмульсии уменьшается на 1 %, при этом улучшается сыпучесть смеси, прочность же сырца и высушенного образца уменьшается в два раза, но при этом фирмы считают, что содержания воска в парафиновой эмульсии достаточно для обеспечения требуемой формуемости, а что касается уменьшения прочности, то фирмы решают этот вопрос средствами механизации и автоматизации прессовочного и транспортного оборудования. При применении парафиновой эмульсии для получения заданной твердости образца количество связки должно быть увеличено на 1,2–1,4 вес. ч.

Разработанный специалистами опытного завода им. Шаумяна (Санкт-Петербург) образец парафиновой эмульсии по своим показателям соответствует парафиновой эмульсии фирмы "Мобил-Ойл" (табл. 2.127). Из сортов декстрина фирма рекомендует тонкоизмельченный декстрин, полученный при переработке риса или кукурузы. Декстрин, полученный из картофеля, является крупнозернистым и не рекомендуется для изготовления кругов зернистостью от М28 до М5. Заменители, такие как древесный экстракт, пектин, извлеченный из сахарной свеклы или мелассы, фенолформальдегидные и карбамидные смолы, фирма не рекомендует к использованию даже в качестве частичных замен декстрина.

Таблица 2.127

Физико-механические свойства формовочных смесей и образцов 25А40 на связке К5

Состав формовочных смесей и свойства образцов	Смесь на жидком стекле	Смесь на гранулированном парафине
Абразивное зерно, вес.ч.	76,3–90,0	75,0–91,4
Керамическая связка, вес.ч.	6,0–19,0	3,9–16,6
Гранулированный парафин, вес.ч.	–	2,0–8,6
Жидкое стекло, вес.ч.	2,4–4,5	–
Сухой декстрин, вес.ч.	0,2–1,6	0,4–1,9
Сыпучесть, г/с	90–100	110–140
Длительность хранения формовочной смеси, ч	2	148
Прочность сырца, МПа	0,020–0,044	0,030–0,056
Прочность обожженного образца, МПа	20,0–40,0	20,0–40,0
Твердость	М1–Т1	М1–Т1

Авторы [139] в целях повышения прочности сырца и сыпучести формовочной смеси, а также обеспечения стабильности свойств формовочной смеси в течение длительного времени предлагают ввести в формовочную смесь парафиновую дисперсию или гранулированный парафин размером гранул 200–400 мкм [140]. Такие гранулы можно получить распылением расплава твердого парафина в потоке холодного воздуха. Количество гранулированного парафина в формовочной смеси составляет 2,0–8,6 мас. %.

Смешивание компонентов формовочной смеси осуществляется известным способом в мешалках любой конструкции в следующей последовательности: абразивное зерно + гранулированный парафин + керамическая связка с декстрином + вода.

В табл. 2.127 представлена рецептура формовочных смесей и свойства образцов, изготовленных с ее применением. Как видно из табл. 2.127, с применением гранулированного парафина длительность хранения формовочных смесей увеличивается от 2 до 148 ч, сыпучесть смеси — от 20 до 40 %, прочность сырца — до 50 % при сохранении прочности обожженного черепка.

В целях повышения прочности свежезаформованного и высушенного абразивного изделия авторами [141] предложена формовочная смесь, состоящая из абразивного материала, керамической связки, увлажнителя, клеящей добавки и временного связующего, в качестве которого применяется 15–35 %-ный раствор сополимера метилметакрилата с натриевой солью метакриловой кислоты при следующем содержании ингредиентов, вес. %: абразивный материал — 65–88; керамическая связка — 5–27; увлажнитель — 1–4; клеящая добавка — 1–4; временное связующее — 1–4. Введение в состав абразивной смеси сополимера обеспечивает увеличение прочностных свойств за счет содержания в сополимере карбоксильных групп, образующих водородные связи с органической добав-

кой смеси. Кроме того, составляющие абразивной смеси обладают хорошей совместимостью при смешивании. Увеличению прочности образцов при сушке (100–120 °С) способствует процесс деполимеризации всех компонентов.

Водный раствор сополимера не обладает вредностью и токсичностью. Концентрация раствора 15–35 % зависит от зернистости и тонины помола связок: чем тоньше помол связки и мельче зернистость абразивного материала, тем меньше концентрация раствора.

Испытания показали, что применение нового временного связующего повышает механическую прочность сырца и высушенного изделия на всех абразивных смесях: из электрокорунда, из монокорунда, из карбида кремния и мелкозернистых абразивных смесей. Так, например, образцы из формовочной смеси 63С40 на связке К10 имеют прочность сырца 0,036 МПа, высушенных — 0,840 МПа, с применением временного связующего ММК — 0,670 и 1,5 МПа соответственно; образцы из формовочной смеси 63С25 на связке К10 имеют прочность сырца 0,028 МПа, высушенного — 0,900 МПа, с временным связующим — 0,040 и 2,300 МПа соответственно.

С.М. Федотовой и Н.Д. Корчагиной были проведены исследования влияния введения в абразивную смесь пульвербакелита и карбофола.

Пульвербакелит вводился в формовочную смесь, увлажненную жидким силикатом. Результаты этих исследований показали, что введение в абразивную смесь 2 вес. ч. пульвербакелита на 100 вес. ч. зерна увеличивает механическую прочность сырца и высушенного образца в 1,5–2 раза, а введение в таких же пропорциях карбофола повышает прочность только высушенных образцов в 5 раз.

Фосфатные связующие

В качестве фосфатных связующих используется либо ортофосфорная кислота, либо растворы кислых фосфатов — неорганических полимеров с разветвленной структурой. Фосфатные связующие характеризуются следующими свойствами: хорошая адгезия, низкая огнеупорность, коррозионная стойкость, возможность регулирования скорости отвердения, способность сохранять форму изделия вплоть до температуры плавления. Это полиэлектролиты, действие их на кожу человека слабее, чем действие жидкого стекла.

В патентах [142, 143] указывается на применение различных видов фосфатных связующих для шлифкругов, термообработка которых производится при температуре до 400 °С. В этом случае фосфаты, очевидно, используются вместо органического связующего.

В настоящее время промышленность России серийно выпускает алюмохромофосфатную связку (АХФС) по ТУ 6-18-166–78. АХФС выпускается в виде либо порошка зеленого цвета, либо вязкого темно-зеленого водного раствора кислых фосфатов алюминия и хрома $(Cr_nAl_{h-n})(H_3PO_4)12$, где n = 1,23.

Основные физико-химические показатели жидкого АХФС:

содержание оксида (Cr_2O_3) — в пределах 3,0–5,0 %;

мольное отношение Al_2O_3/Cr_2O_3 — в пределах 2,0–3,0;

содержание нерастворимого остатка — не более 0,5 %;

содержание сульфатов в пересчете на SO_4 — 0,8 %.

Срок хранения АХФС не ограничен.

Скорость и условия взаимодействия ортофосфорной кислоты H_3PO_4 с различными оксидами металлов зависят от их расположения в периодической таблице Менделеева [144]. С основными компонентами (Al_2O_3, SiO_2) керамических связок, применяемых в производстве абразивного инструмента, H_3PO_4 при комнатной температуре не взаимодействует. Аналогично ведет себя и АХФС.

В работах [145–147] проведены исследования по применению алюмохромофосфатного связующего с соотношением P_2O_5/R_2O_3 = 2,5–3,0, где R — Al^{+3}, Cr^{+3} и B^{+3} или их смесь, при изготовлении абразивного инструмента из зеленого карбида кремния.

Для ускорения процесса упрочнения свежезаформованных изделий был опробован ряд активирующих добавок, позволяющих получить в результате их взаимодействия с АХФС быстро твердеющие на воздухе при комнатной температуре фосфатные соединения. В качестве добавок выбраны карбонаты щелочных и щелочно-земельных металлов (Li_2CO_3, K_2CO_3, Na_2CO_3, $CaCO_3$, $BaCO_3$).

Указанный процесс интенсифицируется при наложении давления в процессе формования вследствие увеличения контактной поверхности, что обеспечивает высокую прочность сырца сразу после формования. Формовочные смеси обладают при этом хорошей сыпучестью, которая характеризуется малым углом естественного откоса.

В табл. 2.128 приведены составы формовочных смесей и свойства образцов, изготовленных на этих формовочных смесях и обожженных при температуре 1250 °С. Для сравнения приведены также прочностные показатели образцов, изготовленных по действующей рецептуре с применением декстрина.

Анализ приведенных результатов позволяет сделать вывод, что применение АХФС с активирующими добавками делает возможным полностью отказаться от применения пищевого декстрина в производстве абразивного инструмента, повысить механическую прочность на изгиб свежезаформованных изделий в 2–3 раза, высушенных — в 1,3–2,5 раза и обожженных — в 1,1–1,3 раза, уменьшить количество керамической связки в абразивном инструменте на 25 % для получения кругов твердостью М2–М3.

Аналогичные результаты получены и на образцах, изготовленных из белого и легированного электрокорунда (табл. 2.129, 2.130). При этом на мелкозернистых массах в рецептуре сохраняется сухой декстрин.

Способы упрочнения кругов

В работе [148] авторами были проведены опыты по упрочнению сырца, изготовленного (без декстрина) двумя способами: 1) продув сырого круга газообразной углекислотой в целях хемосорбции CO_2 и 2) осаждение геля кремниевой кислоты из жидкого стекла и поверхностная термообработка при температуре 700 °С.

При создании поточно-механизированных линий производства кругов диаметром 600 мм стало возможным осуществить способ продувки круга углекислым газом, для чего были определены оптимальные условия продувки [149].

Таблица 2.128

Составы формовочных смесей и физико-механические свойства образцов, полученных с применением АХФС и активизирующих добавок

Состав формовочной смеси, мас. ч.	Объемный вес формовочной смеси, г/см^3	Температура обжига, °С	Предел прочности на изгиб, МПа			Твердость по ГОСТ 18118–79 при P = 0,5 атм	
			свежеза-формованных изделий	высушенных изделий	обожженных изделий	Глубина лунки, мм	Степень тведости
Зеленый карбид кремния 63С40 – 100,0 Связка К3 – 20,0 Сухой декстрин – 1,0 40%-ный раствор декстрина – 4,0	1,920	1250	0,002	0,9	14,3	3,7	М2
Зеленый карбид кремния 63С40 – 100,0 Связка К3 – 15,0 Связка АХФС – 10,0 Активирующая добавка Li_2CO_3 – 1,2	1,935	1250	0,042	1,01	15,1	3,1	М3
Активирующая добавка K_2CO_3 – 1,2	1,936	1250	0,004	2,42	16,3	3,4	М2
Активирующая добавка $MgCO_3$ – 1,2	1,935	1250	1,06	1,28	18,5	3,3	М2–М3
Активирующая добавка $CaCO_3$ – 1,2	1,935	1250	0,0045	2,21	18,7	3,1	М3
Активирующая добавка $BaCO_3$ – 1,2	1,936	1250	0,006	1,41	19,5	2,8	М3–СМ1

Таблица 2.129

Физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого марки 25А на связке К5 (АХФС — 10 вес. ч., MgO — 1,2 вес. ч.)

Марка и зернистость	Количество связки, мас. %	Структура	Прочность образцов на изгиб, МПа			Твердость	
			свежезаформованных	высушенных	обожженных	Глубина лунки, мм	ГОСТ 18118–79
25А50	7	6	0,06	1,68	19,9	3,0	С1
	11	6	0,10	1,52	22,4	2,2	СТ1
	14	5	0,17	1,85	24,3	1,6	СТ3
25А40	7	6	0,09	2,24	22,7	2,7	С2
	11	6	0,15	2,67	26,6	1,5	СТ3
	14	5	0,20	2,58	28,3	1,4	Т1
25А25	6	7	0,07	1,25	21,6	5,8	СМ1
	13	7	0,12	3,17	28,0	2,6	С2
	17	6	0,20	3,82	28,2	2,0	СТ1
25А16	7	7	0,05	1,39	22,4	5,2	СМ1
	16	7	0,12	3,09	36,2	3,3	С1
	20	6	0,13	2,20	40,5	2,5	С2

Таблица 2.130

Физико-механические свойства образцов из электрокорунда белого марки 25А и легированного электрокорунда марки 91А на связке К5

Марка и зернистость материала	Компоненты смеси, мас. ч.			Структура	Объемный вес, г/см^3	Прочность образцов на изгиб, МПа			Твердость	
	Связка	Сухой декстрин	АХФС			свежесформованных	высушенных	обожженных	Глубина лунки, мм	ГОСТ 18118–79
25А12	12,8	2,4	4,5	8	2,17	0,06	0,90	30,0	4,5	СМ2
25А10	8,8	3,2	3,8	8	2,11	0,02	0,29	26,2	6,5	СМ1
	12,3	2,9	4,5	8	2,17	0,03	0,79	29,0	5,7	СМ1
	14,0	2,8	5,0	8	2,21	0,06	1,22	32,0	5,0	СМ2
	17,9	2,6	6,0	8	2,30	0,07	1,93	38,0	4,2	С2
25А5	13,3	2,9	5,5	9	2,10	0,03	0,92	30,0	5,8	СМ1
	16,3	2,5	6,3	9	2,17	0,04	1,1	33,0	5,4	СМ1
	18,2	2,3	7,3	9	2,24	0,05	2,13	39,0	4,7	СМ2
	26,3	2,1	8,8	9	2,38	0,08	3,30	48,0	3,2	СТ2
25АМ40	10,4	2,7	7,8	10	2,0	0,02	1,25	27,0	6,1	СМ1
	14,8	2,4	8,8	10	8,1	0,03	1,56	28,0	5,2	СМ1
	18,7	2,1	9,8	11	2,06	0,04	1,8	30,5	4,5	СМ2
	24,1	1,7	10,8	11	2,16	0,04	2,0	32,0	4,0	С2
91А10	8,8	3,2	3,8	8	2,11	0,01	0,28	27,9	5,8	СМ1
	12,3	2,9	4,5	8	2,17	0,02	0,75	34,6	5,1	СМ2
	14,0	2,8	5,0	8	2,21	0,03	1,2	35,6	4,2	С2
	17,9	2,6	6,0	8	2,30	0,04	1,89	38,1	3,6	СТ1

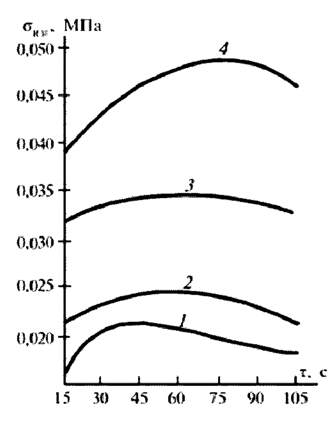


Рис. 2.68. Влияние времени продувки τ образцов, приготовленных из абразивных смесей различного состава, на их механическую прочность на изгиб $\sigma_{изг}$:

1 — контрольная смесь; *2* — смесь без декстрина с добавкой 0,2 мас. %; *3* — смесь без декстрина с добавкой 0,5 мас. % воды; *4* — смесь без декстрина с добавкой 1 мас. % 10 %-ного раствора NaOH

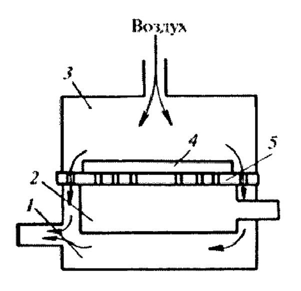


Рис. 2.69. Принципиальная схема устройства для обдувки:

1 - камера для отвода нагретой газообразной среды; *2* — вакуумная камера; *3* — металлический кожух с патрубком; *4* — свежезаформованный круг; *5* — подкладная плита с отверстиями

Насыщение образцов углекислым газом проводили в герметичной пропиточной камере, в которую от баллона через ротаметр подводили газ при давлении 0,2 МПа. После взаимодействия с образцом газ удалялся через узкие щели в дне камеры. Давление углекислого газа внутри рабочего объема контролировали манометром.

На рис. 2.68 приведена зависимость механической прочности на изгиб от времени продувки образцов, приготовленных из формовочных смесей различного состава. Как видно из рис. 2.68, оптимальная длительность продувки находится в интервале 45–60 с. При продувке более 60 с наблюдается незначительное понижение прочности. Наименьшую величину механической прочности на изгиб имели образцы, приготовленные из контрольной массы состава, вес. %: 25А40СМ1 — 100; жидкое стекло — 3,1; связка К5 — 7,45; сухой декстрин — 1,5. Исключение из массы декстрина позволило повысить прочность образцов после продувки в среднем на 30 %. При введении 1 мас. % 10 %-ного раствора NaOH в абразивную смесь почти в два раза увеличивается прочность образцов после продувки. Однако свойства абразивной смеси ухудшаются: она становится более влажной, менее сыпучей, а сырец, изготовленный из нее, имеет меньшую механическую прочность.

Авторы [150] предложили способ повышения механической прочности свежезаформованного круга и ускорения процесса сушки, при котором подкладная плита (имеющая отверстия) с кругом устанавливается в вакуумную камеру и обдувается нагретым до 40–60 °С воздухом или отводимыми от печей газами в течение 1–3 мин (рис. 2.69).

На рис. 2.70 представлена зависимость прочности круга от температуры и времени обдувки в диапазоне 30–480 с. Из данных рисунка следует, что для получения максимального упрочнения свежезаформованного изделия температура воздуха должна быть в интервале 40–60 °С. При этом более высокая механическая прочность (до 20 %) достигается практически за 2 мин по сравнению с изде-

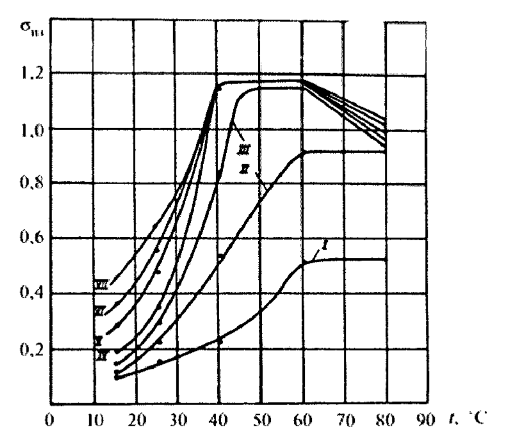


Рис. 2.70. Зависимость прочности кругов от температуры и времени обдувки:
I — 30 с; *II* — 60 с; *III* — 90 с; *IV* — 120 с; *V* — 240 с; VI — 360 с; *VII* — 480 с

лиями, просушенными в сушиле при t = 110 °С в течение 2 ч. Эти закономерности сохраняются для инструмента, изготовленного из электрокорундовых материалов, содержащих в качестве временного связующего жидкое стекло, а также из карбида кремния, увлажненного раствором декстрина.

Глава 3

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Технологический процесс производства абразивного инструмента на керамической связке состоит из последовательно выполняемых технологических операций: приготовления формовочной смеси, формования, термической обработки, механической обработки, контроля качества, маркировки и упаковки.

Схема технологического процесса производства абразивного инструмента представлена на рис. 3.1.

3.1. Абразивные формовочные смеси

Абразивные формовочные смеси — это смеси, состоящие из абразивного зерна, связки и клеящего вещества (увлажнителя), подготовленные для формования из них абразивных изделий. Разделяют формовочные смеси на полусухие

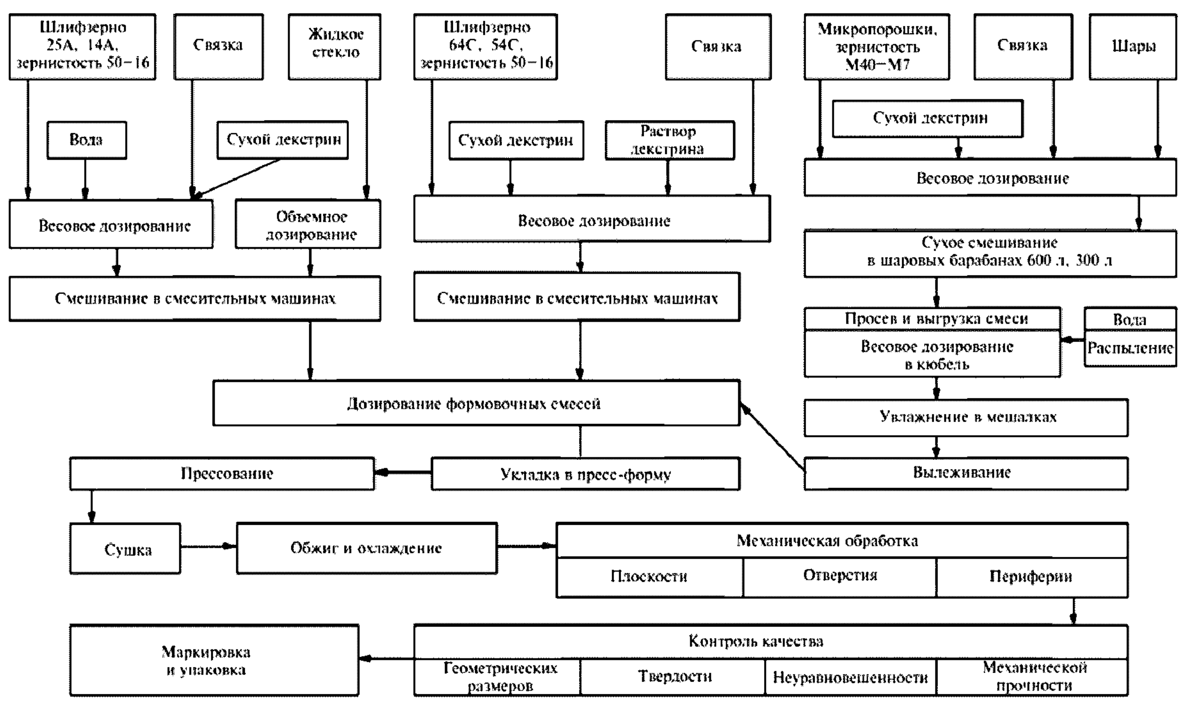


Рис. 3.1. Технологическая схема производства абразивного инструмента

(применяемые для формования изделий методом полусухого прессования), и жидкие (используемые для изготовления изделий методом шликерного литья).

В данном случае коснемся характеристики формовочных смесей, из которых изделия прессуются.

В зависимости от характеристики изготавливаемого изделия (зернистость, твердость, структура) изменяются соотношения в нем зерна, связки и увлажнителя. Объемное содержание зерна в абразивном инструменте определяет его структуру: чем меньше содержится зерна, тем выше номер структуры инструмента. Увеличение содержания связки для данной структуры вызывает повышение твердости готового изделия. С увеличением количества связки или твердости при постоянной структуре пористость абразивного инструмента уменьшается.

Уменьшение пористости с увеличением твердости на одну степень несколько выше у мелкозернистых формовочных смесей, чем у крупнозернистых, так как для получения одинаковых твердостей мелкозернистые изделия требуют введения в формовочные смеси больше связки, поскольку увеличивается количество зерен в единице объема и, соответственно, поверхность, которую надо связать связкой.

На составы формовочных смесей влияет вид связки. Смеси, изготовленные на связках с применением качественных глин, более пластичные, чем смеси, изготовленные на связках с использованием каолинов. С увеличением количества фритт в связке пластичность формовочных смесей падает. Составы формовочных смесей, приготовленные на легкоплавких связках (стеклах), имеют самую низкую пластичность.

Введение клеящего увлажнителя обусловливается необходимостью придать формовочной смеси соответствующую формуемость, а заформованным изделиям возможно более высокую механическую прочность. Оптимальным количеством клеящего вещества, вводимого в формовочную смесь, считается такое его количество, при котором свежезаформованные изделия обладают максимальной механической прочностью. При этом оно зависит также от вида увлажнителя (жидкое стекло, декстрин, парафиновые эмульсии и др.), от концентрации и собственных свойств, от вида и пластичности связки, от ее содержания в формовочной смеси, от марки абразивного материала.

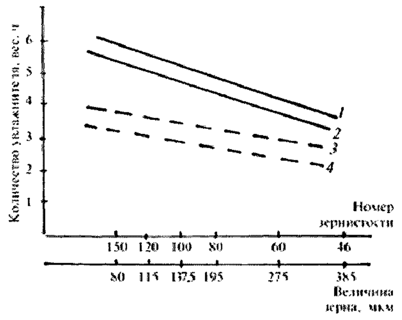


Рис. 3.2. Изменение количеств различных увлажнителей, вводимых в формовочные смеси в зависимости от изменения зернистости последних:

1 — 25А 25 СМ2 7 К5 увлажнитель жидкий силикат плотности 1,46–1,48; *2* — 25А 25 СМ2 7 К5 увлажнитель жидкий силикат плотностью 1,45; *3* — 64С 25 СМ2 7 К10 увлажнитель 40 %-ный раствор декстрина; *4* — 64С 25 СМ2 7 К10 увлажнитель 20 %-ный раствор декстрина

Оптимальное количество увлажнителя на 100 вес. ч. зерна различно для разных абразивных материалов

и растет с уменьшением величины зерна (с увеличением номера зернистости) (рис. 3.2).

Абразивные формовочные смеси приготавливаются по рецептурам.

Рецептура формовочной смеси и методы ее расчета

Рецептура представляет собой систему рецептов формовочных смесей из всех шлифовальных материалов, применяемых для изготовления абразивного инструмента, различной их зернистости, заданной твердости, структуры и различных керамических связок. При производстве абразивного инструмента на керамической связке насчитывается около 1500 рецептур.

В связи с тем что твердость инструмента определяется тремя методами: с применением пескоструйного прибора (ГОСТ 18118–79), методом вдавливания шарика (ГОСТ 19202–73) и неразрушающим методом (ГОСТ 25961–83), необходимо разрабатывать рецептуру для каждого метода отдельно.

Для разработки рецептуры вначале определяется оптимальное количество увлажнителя для каждой смеси и далее вычисляется расход увлажнителя на 1 вес. ч. связки и на 1 или 100 вес. ч. зерна.

Пример № 1: расчет количества увлажнителя в формовочной смеси. Допустим, определение оптимального количества увлажнителя проводится для смесей, состоящих из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 40, на связке К20, увлажняемой жидким стеклом плотностью 1,48–1,50 г/см^3.

Формовочные смеси готовятся с 5; 6,5; 8 вес. ч. связки. Максимальная механическая прочность из этих смесей получена: с 5 вес. ч. связки при содержании увлажнителя 3,0 вес. ч.; с 6,5 вес. ч. связки — 3,4 вес. ч.; с 8 вес. ч. — 3,8 вес. ч. соответственно. Таким образом, при увеличении количества связки на 1,5 вес. ч. количество увлажнителя увеличивается на 0,4 вес. ч., следовательно, на одну весовую часть связки требуется клеящего увлажнителя 0,4/1,5 = = 0,27 вес. ч. Исходя из этого на 5 вес. ч. связки расходуется 1,35 вес. ч. увлажнителя, а остальное количество увлажнителя (3,00 – 1,35 = 1,65 вес. ч.) — на 100 вес. ч. зерна.

Экспериментальными работами специалистов ВНИИАШа (С.Г. Воронов, Н.Д. Корчагина, А.А. Куров и др.) установлено оптимальное количество увлажнителя на 1 вес. ч. связки для различных связок, находящееся в пределах: при применении жидкого стекла — 0,27–0,45 вес. ч.; при использовании раствора декстрина (20–50 %-ной концентрации) — 0,2–0,4 вес. ч.

При использовании других увлажнителей оптимальное его количество устанавливается так же экспериментально.

Метод расчета состава формовочных смесей, предложенный В.Н. Любомудровым, основан на классическом плане эксперимента Зайделя—Гаусса и требует большого количества экспериментов, связанных с изготовлением n_1 n_2 n_3 рецептов, где n_1 — число градаций по степени твердости; n_2 — по количеству зернистостей, для которых составляется система рецептов; n_3 — по количеству структур.

Пример № 2. Необходимо рассчитать рецепт для изготовления абразивного круга из электрокорунда белого марки 24А зернистостью 40, структуры 5, твердостью С1 на керамической связке К20; потери при прокаливании связки 5,6 %; увлажнитель — жидкое стекло с плотностью 1,48–1,50.

Из табл. 1.10 (см. гл. 1, ч. II) видно, что для структуры 5 необходимо 52 % зерна и 9 % связки по объему. Переводим соотношение объемных процентов в массовые и получаем:

необходимое количество зерна:

52·3,96 г/см^3 = 202,6 вес. ч.;

необходимое количество связки:

9·2,5 г/см^3 = 22,5 вес. ч.,

где 3,96 и 2,5 — удельные веса электрокорунда и связки соответственно, г/см^3.

С учетом потери при прокаливании связки 5,6 % количество сырой связки в формовочной смеси будет таким:

22,5 — 94,4;

x — 100.

$$x = \frac{22{,}5 \cdot 100}{94{,}4} = 23{,}0 \text{ вес. ч. связки.}$$

Если на увлажнение 100 вес. ч. зерна требуется 1,65 вес. ч. жидкого стекла, а на 100 вес. ч. связки — 27 вес. ч., то на формовочную смесь необходимо ввести увлажнителя

$$\frac{202{,}6 \cdot 1{,}65}{100} + \frac{23{,}0 \cdot 27{,}5}{100} = 10{,}4 \text{ вес. ч.,}$$

где 202,6 — зерно, вес. ч.; 23,0 — связка, вес. ч.

Таким образом, формовочная смесь будет состоять:

из электрокорунда белого марки 25А40 — 202,8 вес. ч.;

из керамической связки К20 — 23,0 вес. ч.;

из жидкого стекла — 10,4 вес. ч.

Итого — 237 вес. ч.

На 100 см^3 объема изделий данной структуры (5) приходится 237 вес. ч. массы, т. е. объемный вес сырого необожженного изделия будет равен 2,37 г/см^3. Умножая объем круга на 2,37 г/см^3, получаем вес необожженного круга.

С.Г. Вороновым в 1963 году был применен новый метод нормирования рецептуры для изготовления кругов различных характеристик, основанных на сохранении постоянства соотношения количества шлифзерна и связки. Относительное постоянство соотношения количества шлифзерна и связки по мере повышения твердости обеспечивается за счет одновременного уплотнения структуры. Пример системы рецептов приведен в табл. 3.1. Эта система практически действует до настоящего времени.

***Пример № 3**: расчет объемного веса массы абразивной смеси по рецепту.* Допустим, что необходимо рассчитать объемную массу формовочной смеси твердости М3 структуры 6. В этом случае расчет производится по формуле

$$\gamma = \frac{50 \cdot 3{,}96(100 + 7{,}2 + 3{,}6 + 2{,}2)}{100^2} = 2{,}23 \text{ г/см}^3,$$

где 50 — объемное содержание зерна при структуре 6 (см. табл. 1.1); 3,96 — удельный вес электрокорунда, г/см^3; 100 — шлифзерно, вес. ч.; 7,2 — связка, вес. ч.; 3,6 —жидкое стекло, вес. ч.; 2,2 — декстрин, вес. ч.

Таблица 3.1

Система рецептов для изготовления шлифовальных абразивных кругов из электрокорунда белого зернистостью 40 на связке К5

Номер структуры	Компонент на 100 вес. ч. шлифовального зерна	М2	М3	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ3	Т1	Т2
	Связка	7,2	8,5	9,9	11,3	12,8	14,8	–	–	–	–	–
	Жидкое стекло	3,6	3,9	4,2	4,6	5,0	5,4	–	–	–	–	–
7	Вода	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Сухой декстрин	2,2	2,0	1,5	1,2	1,0	–	–	–	–	–	–
	Объемный вес, г/см³	2,14	2,17	2,19	2,22	2,25	2,27	–	–	–	–	–
	Связка	7,2	8,4	9,7	11,0	12,3	13,6	14,9	16,3	–	–	–
	Жидкое стекло	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,2	5,6	6,0	–	–	–
6	Вода	–	–	–	–	–	–	–	0,3	–	–	–
	Сухой декстрин	2,2	2,0	1,5	1,2	1,0	1,0	–	–	–	–	–
	Объемный вес, г/см³	2,23	2,26	2,28	2,30	2,33	2,37	2,38	2,42	–	–	–
	Связка	–	–	–	–	–	–	12,5	13,9	15,3	16,6	17,8
	Жидкое стекло	–	–	–	–	–	–	4,9	5,3	5,7	6,0	6,0
5	Вода	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,3	0,5
	Сухой декстрин	–	–	–	–	–	–	1,0	–	–	–	–
	Объемный вес, г/см³	–	–	–	–	–	–	2,48	2,43	2,49	2,52	2,5

***Пример № 4:** разработка рецептуры с использованием пескоструйного метода контроля по ГОСТ 18118–79.* Рассмотрим пример разработки формовочной смеси для получения твердости М2–СМ2 структуры 6 для 24А40 на связке К5. Для разработки рецептуры изготавливаются образцы диаметром 100 мм. Образцы обжигаются при температуре 1250 °С. На обожженных образцах определяется глубина лунки и строится график твердость — глубина лунки от количества связки (рис. 3.3). По полученной зависимости определяется количество связки, соответствующее среднему значению твердости: для М1 — 4,3; для М2 — 5,7; для М3 — 7,0; для СМ1 — 8,2; для СМ2 — 9,3, затем определяется

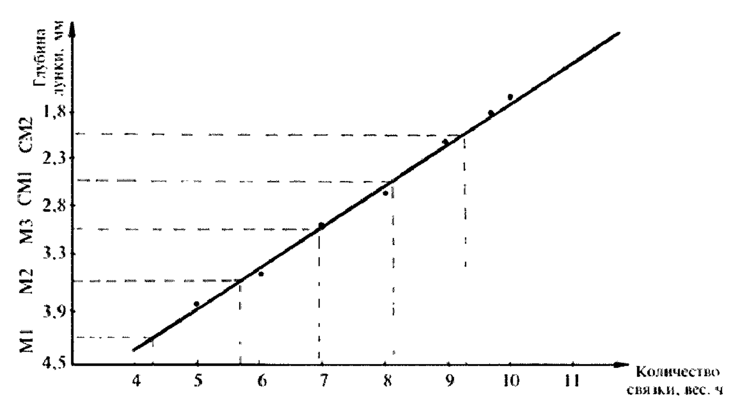


Рис. 3.3. Зависимость твердости от количества связки

количество увлажнителя и клеящей добавки и рассчитывается объемный вес массы по указанным выше примерам.

Разработка рецептуры с использованием акустического метода контроля

При проверке абразивного инструмента по ГОСТ 25961–83 определяется приведенная скорость распространения акустических волн C_l, по значению которой рассчитывается звуковой индекс (ЗИ) инструмента. Область значений C_l от 3500 до 6300 относится к инструменту на керамической связке.

При разработке рецептуры изготовляются опытные образцы кругов, например, 250 × 32 × 76 мм для проверки на приборе "Звук 203" с различным количеством связки в формовочной смеси (шаг по связке 1, или 1,5, или 2 вес. ч.). Следует иметь в виду, что при использовании акустического метода контроля определяется интегральная характеристика изделия, поэтому в качестве образцов необходимо производить выбор типоразмеров кругов, у которых при соблюдении технологического процесса обеспечивается неравномерность твердости по крайней мере не более ±0,5 степени.

На образцах кругов определяется параметр C_l и строится график зависимости C_l от количества связки (рис. 3.4) [151, 152].

По полученной зависимости определяется количество связки, соответствующее среднему значению C_l для каждого звукового индекса (для ЗИ43 — 4,2; для ЗИ45 — 5,6; для ЗИ47 — 7,0; для ЗИ49 — 8,2; для ЗИ51 — 9,8; для ЗИ53 — 11,3), а затем определяется количество увлажнителя и рассчитывается объемный вес массы по указанным выше примерам. Пример рецептуры представлен в табл. 3.2.

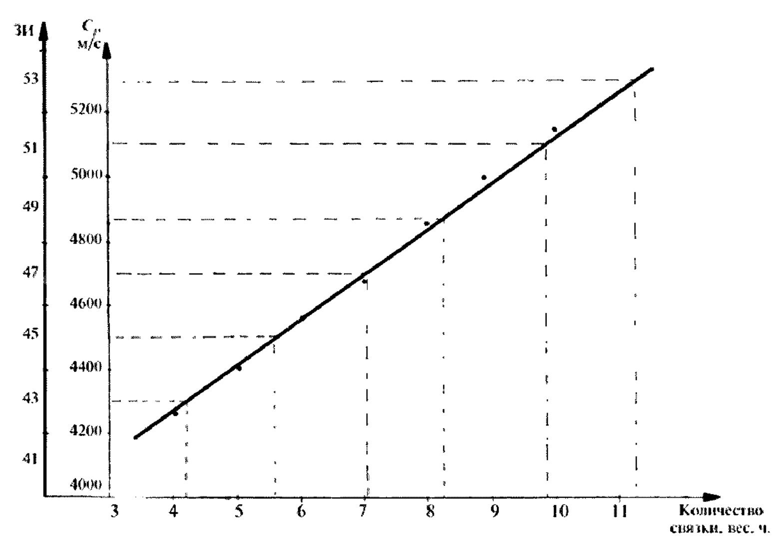


Рис. 3.4. Зависимость параметра C_l (ЗИ) от количества связки

Таблица 3.2

Пример рецептуры для изготовления шлифовальных кругов, определяемых с использованием акустического метода контроля по ГОСТ 25961–83

Номер струк-туры	Компоненты на 100 вес. ч. шлифовального зерна	Звуковые индексы							
		37	39	41	43	45	47	49	51
6	Связка	–	–	–	4,2	5,6	7,0	8,2	9,8
	Жидкое стекло	5,5	7,2	8,4	9,7	11,0	12,3	13,6	14,0
	Сухой декстрин	2,2	2,0	1,5	1,2	1,0	1,0	–	–
	Объемный вес, г/см^3	2,21	2,23	2,26	2,28	2,30	2,33	2,37	2,38

Факторное планирование эксперимента при расчете формовочных смесей

Преимущества факторного эксперимента перед классическим методом и методика его применения подробно освещены в литературе [153–155]. Рассмотрим этот метод применительно к данному случаю, когда необходимо рассчитать рецептуру формовочных смесей.

При получении зависимостей для расчета состава формовочных смесей [156] было принято следующее допущение: связка равномерным слоем покрывает всю поверхность зерен независимо от зернистости материала и структуры черепка, но в зависимости от твердости черепка она заполняет ту или иную часть пор в местах соприкосновения зерен друг с другом. Следовательно, необходимое количество связки зависит от величины поверхности абразивного материала в единице объема черепка и заданной твердости изделия. Было принято также, что количество связки зависит от величины поверхности абразивного материала в единице объема черепка и количества связки в нем, т. е. от твердости образца.

Обозначим поверхность абразивного материала в единице объема черепка z_1, а твердость инструмента — z_2. За базовые условия принимаются средние из наиболее вероятных значений таких параметров, как структура черепка, номер зернистости материала, твердость инструмента. Значения z_1 и z_2 варьируются в определенных пределах $(1{,}2 \pm \Delta z)$ в соответствии с планом двухфакторного эксперимента.

Проще варьировать количество поверхности абразивного материала, если структура черепка остается постоянной, а изменяется лишь номер зернистости материала. Для проверки справедливости предпосылок и полученных уравнений возможен и другой вариант: варьировать структуру черепка, оставив зернистость материала без изменения.

В табл. 3.3 показан пример планирования эксперимента, занесения и обработки данных при определении уравнений связи между заданными параметрами и регулируемыми факторами.

В соответствии с матрицей (см. табл. 3.3) нужно получить четыре разновидности черепка, отличающиеся друг от друга поверхностью абразивного материала и твердостью образца. Чтобы заформовать и получить образцы заданной твердости и структуры, необходимо экспериментально для каждого из

Таблица 3.3

Пример планирования эксперимента

Показатели	Величины заданных параметров		Величины регулируемых факторов	
	Z_1	Z_2	C	K
Базовый уровень	Z_{01}	Z_{02}	B_{0c}	$B_{0к}$
Единица варьирования	$\pm\Delta Z_1$	$\pm\Delta Z_2$		
Верхний уровень (+)	$Z_{01}+\Delta Z_1$	$Z_{02}+\Delta Z_2$		
Нижний уровень (–)	$Z_{01}-\Delta Z_1$	$Z_{02}-\Delta Z_2$		
Матрица, определяющая значения заданных параметров в образцах:				
1	$+Z_{01}+\Delta Z_1$	$+Z_{02}+\Delta Z_2$	C_1	K_1
2	$-Z_{01}-\Delta Z_1$	$+Z_{02}+\Delta Z_2$	C_2	K_2
3	$+Z_{01}+\Delta Z_1$	$-Z_{02}-\Delta Z_2$	C_3	K_3
4	$-Z_{01}-\Delta Z_1$	$-Z_{02}-\Delta Z_2$	C_4	K_4
Коэффициенты регрессии, рассчитанные по различным функциям отклика	B_{1c} $B_{1к}$	B_{2c} $D_{2к}$	– –	– –

них с применением факторного эксперимента подобрать количество связки C и клеящего вещества K.

Найденные для каждого образца значения факторов C и K используются для получения уравнений регрессии:

$$C = b_{0c} + b_c \frac{\Delta z_1'}{\Delta z_1} + b_{2c} \frac{\Delta z_2'}{\Delta z_2}; \quad (3.1)$$

$$K = b_{0к} + b_{1к} \frac{\Delta z_1'}{\Delta z_1} + b_{2к} \frac{\Delta z_2'}{\Delta z_2}. \quad (3.2)$$

Предположим, что на связке найденного состава требуется изготовить образец из материала заданной зернистости, структуры и твердости. Для расчета количества связки и клеящего вещества в абразивно-керамической смеси определяется значение поверхности абразивного материала в единице объема черепка, затем отклонения ($\Delta z'_{1,2}$) между базовыми значениями поверхности и твердости ($z_{01,2}$) и их заданными значениями ($z_{01,2}$), отношения этих отклонений $\left(\frac{\Delta z_1'}{\Delta z_1} \text{ и } \frac{\Delta z_2'}{\Delta z_2}\right)$ с соответствующим знаком подставляются в уравнения регрессии (3.1) и (3.2). Найденные значения количества связки и клеящего вещества используются при составлении рецептуры формовочной смеси.

Авторы [157] считают, что применение при расчете рецептуры метода крутого восхождения требует введения в качестве одного из факторов поверхности абразивного материала в единицу объема, что затруднительно. А этот фактор не удовлетворяет одному из требований, предъявляемых к факторам при активном эксперименте [153]. Кроме того, отсутствуют надежные данные о его количественном выражении для всей гаммы абразивных материалов

и зернистостей. В связи с этим авторы на конкретном примере с использованием абразивного материала С64С на связке К10 показали возможность расчета рецептур абразивно-керамических смесей, в основу которого положен эксперимент, проведенный по центральному композиционному плану (15 рецептов для пяти зернистостей, четырех структур и всей гаммы твердостей) с последующим расчетом уравнений квадратичной регрессии, глубины лунки по ГОСТ 18118—79, применяемой в качестве показателя твердости H по переменным: V — объемное содержание зерна, %; P — количество весовых частей связки на 100 вес. ч. зерна; z — зернистость, кодируемая с помощью переменной x_3, принимающей следующие значения: при z = 50, 40, 25, 16, 12 соответственно $x_3 = -1{,}681; -1; 0; +1; +1{,}681$.

Карта проведения эксперимента приведена в табл. 3.4. Расчеты производились на ЭЦВМ "Мир-1" в соответствии с алгоритмом (158), в котором величина, характеризующая твердость H, определяется по формуле

$$H = A - 0{,}5 + \frac{d - d_1(A)}{d_2(A) - d_1(A)},$$

где A — порядковый номер степени твердости, закодированной так, что для инструмента твердостью М1 (−) $A = 0$, для инструмента твердостью М2 $A = 1$ и т. д.; d — глубина лунки, мм; $d_1(A)$, $d_2(A)$ (−) — предельные глубины лунки по ГОСТ 18118—72 для данной степени твердости в соответствии с режимами испытания: 1) камера объемом 28 см^3, давление 0,5 атм или 2) камера объемом 28 см^3, давление 1,5 атм.

В результате проведения эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

$$H = 4{,}359 + 1{,}312x_1 + 3{,}160x_2 + 0{,}665x_3 + 0{,}101x_1x_2 + 0{,}109x_1x_3 +$$
$$+ 0{,}361x_2x_3 - 0{,}3880x_1^2 - 0{,}0203x_2^2 - 0{,}9620x_3^2.$$

Адекватность этой модели проверена по критерию Фишера: зная зависимости $H(x_1, x_2, x_3)$ и задав структуру (x_1) и зернистость (x_3), можно однозначно определить x_2 — количество связки P, т. е. получить систему рецептов для абразивного материала.

В табл. 3.5 приведены результаты расчета количества связки, необходимой для получения абразивного инструмента определенной зернистости, твердости и структуры. Для сравнения приведены данные по количеству связки, применяющемуся в системе рецептов, разработанных экспериментально для одного из заводов.

Результаты проведенного исследования показали, что применение центрального композиционного плана с последующей математической обработкой результатов позволяет рассчитать количество связки, а также увлажнителя для составления рецептуры абразивных смесей. Данный метод расчета сокращает количество опытов в 10—12 раз по сравнению с классическим планом.

В работе [158] предложена методика составления рецептов абразивного инструмента с применением планов на трех уровнях: близких к Д — оптимальный, ВД$_{1,2}$ — для режущего слоя и В$_3$ — для корпуса круга (в случае изготовления двухслойных кругов).

Таблица 3.4

Карта проведения композиционного эксперимента

Обозначение фактора	X1 (объемное)	X2 (количество)	X3 (зернистость)	Натуральные значения факторов			Функция цели – твердость (средние значения для 10 образцов)			Коэффициенты регрессии (с учетом их среднеквадратичных отклонений)
Основной уровень	49 %	22,5	25	V	P, вес. ч.	Z	по ГОСТу		по формуле	
Интервал варьирования	1,8 %	7,5	См. примечание				d, мм	Степень твердости		
1	–1	–1	–1	47,2	15	40	6,88	ВМ2	–1,8	$B_0 = 4{,}358 \pm 0{,}351$
2	1	–1	–1	50,8	15	40	4,74	М1	0,36	$B_1 = 1{,}312 \pm 0{,}135$
3	–1	1	–1	47,2	30	40	3,76	С1	5,15	$B_2 = 3{,}160 \pm 0{,}135$
4	1	1	–1	50,8	30	40	2,70	СТ1	7,2	$B_3 = 0{,}665 \pm 0{,}135$
5	–1	–1	1	47,2	15	16	6,98	ВМ2	–1,88	$B_{12} = 0{,}101 \pm 0{,}177$
6	1	–1	1	50,8	15	16	4,90	С2	0,2	$B_{13} = 0{,}109 \pm 0{,}177$
7	–1	1	1	47,2	30	16	9,00	СТ3	9,0	$B_{23} = 0{,}361 \pm 0{,}177$
8	1	1	1	50,8	30	16	–	СТ3	9,0	$B_{11} = -0{,}3879 \pm 0{,}1639$
9	0	0	0	49	22,5	25	5,04	С	4,3	$B_{22} = -0{,}0203 \pm 0{,}1639$
10	0	0	0	49	22,5	25	5,03	С	4,3	$B_{33} = -0{,}9620 \pm 0{,}1639$
11	+1,667	0	0	52	22,5	25	3,97	С1	6,1	–
12	–1,667	0	0	46	22,5	25	4,04	М2	0,967	–
13	0	+1,68	0	49	35,1	25	2,81	СТ2	8,35	–
14	0	–1,68	0	49	9,9	25	4,20	М2	0,8	–
15	0	0	+1,681	49	22,5	12	3,19	СМ2	3,7	–
16	0	0	–1,681	49	22,5	50	2,47	М2	1,42	–

Примечание. Из всех взаимодействий значимо только взаимодействие количество связки — зернистость. Квадратичный эффект от количества связки незначим.

Таблица 3.5

Результаты расчета количества связки на 100 вес. ч. зерна для получения абразивного инструмента различной структуры и твердости

Структура круга	Количество связки, необходимой для получения абразивного инструмента различных твердостей, вес. ч. на 100 вес. ч. зерна (зернистость № 16)									
	M1	M2	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2	CT3
5	10,9	13,0	15,0	17,0	19,1	21,1	23,2	25,3	27,4	29,4
6	12,4	14,4	16,5	18,6	20,7	22,8	24,9	27	29,1	31,2
7	15,4; 15*	17,5; 17*	19,7; 19*	21,9; 22*	24; 24*	26,2; 25*	28,3; 27*	30,5; 29*	32,7; 32*	35; 35*
8	17, 17,5*	19,2; 19*	21,4; 21*	23,6; 24*	25,8; 26*	28; 28*	30,2; 29,2*	32,4; 31,5*	34,7; 35*	36,9; 36*
5	9,3	11,6	13,8	16	18,3	20,6	22,9	25,2	27,5	29,8
6	10,8	13	15,3; 16*	17,6; 17*	20,0; 21*	22,3; 22*	24,6; 24*	26,5; 27*	29,3; 29*	31,7; 32*
7	13,8*	16,2; 18*	18,6; 20*	21; 22*	23,4; 24*	25,8; 28*	28,3; 28*	30,7; 30*	32,2; 32*	35,6; 34*
8	15,4	17,8	20,3	22,7	25,2	27,7	30,2	32,7	35,7	37,7
5	11,2	13,3; 13*	15; 15*	17,6; 18*	20,7; 20*	22,9; 21*	25,1; 24*	27,7; 25*	30,3; 27*	32,8; 30*
6	13,5	15,1; 15*	16,6; 18*	19,3; 20*	22,0; 22,5	24,6; 24*	17,1; 27*	29,6; 30*	31,3; 32,5	35; 35,5*
7	15; 16*	17,4; 19,6*	19,9; 21*	22,7; 24,5*	25,4; 27*	28,2; 28*	31; 30,5*	33,8; 34*	36,6; 36*	39,4; 38*
8	16,6	19,1	21,8	24,6	27,4	30,2	32,1	36	39	41
5	12; 12*	14,7; 15*	17,5; 18*	20,3; 20*	23,1; 22,5	25,9; 24,8*	28,7; 27,5	31,6; 24,6*	34,5; 33*	**
6	**	16,3; 18*	19,2; 21*	22,0; 22,5*	24,9; 24*	27,8; 27*	30,7; 29*	33,7; 31,5	**	**
7	**	19,8	22,8	25,8	28,9	31,9	35	38,1	**	**
8	**	21,7	24,8	27,9	31,0	34,2	37,3	40,5	**	**

* — по рецептуре на одном из абразивных заводов.

** — точки лежат за пределами области эксперимента и области адекватности уравнения.

3.2. Приготовление полусухих формовочных смесей

Приготовление формовочных смесей состоит из дозирования, смешивания и рыхления.

Сложность приготовления формовочной смеси заключается в том, что необходимо достичь оптимальной однородности смеси путем смешивания компонентов, существенно различающихся по плотности (от 0,4 до 4 г/см^3), по количественному соотношению (от 2 до 80 %), по гранулометрическому составу, и выдержать одновременно невысокие допускаемые отклонения по массе этих компонентов в составе формовочной смеси (не более ±1 %).

Абразивное зерно и другие составляющие смеси транспортируются со склада на участок приготовления формовочных смесей обычно при помощи соответствующих подъемников и элеваторов. Абразивное зерно загружается в бункеры, расположенные над смесительными машинами, в которых готовится формовочная смесь, или достаточно близко от них. В этих бункерах зерно хранится и периодически расходуется для приготовления формовочных смесей. Бункеры с другими компонентами формовочной смеси расположены на верхнем этаже цеха, вниз спускаются только течки — патрубки — с расположенными под ними весовыми и дозирующими устройствами. Все материалы, поступающие в производство, используются только с паспортом, характеризующим их качество.

Дозирование компонентов формовочных смесей

Дозирование компонентов формовочной смеси в смесительную машину производится в соответствии с рассчитанным рецептом по массе и по объему. Сыпучие материалы (шлифзерно, шлифпорошки) и жидкие материалы (жидкое стекло, вода) могут дозироваться как по массе, так и по объему. Материалы, которые слеживаются в процессе транспортировки и хранения (микропорошки, связки, сухой декстрин), обязательно требуют весового дозирования.

Из всех устройств, работающих по методу объемного дозирования легкосыпучих материалов, наибольшее распространение получили дозаторы типа ДЗ (рис. 3.5) [159]. Они предназначены для дозирования абразивного зерна. Дозаторы просты по конструкции, надежны в эксплуатации и дают стабильные результаты при влажности абразивных материалов до 3 %, обеспечивая погрешность ±1 %. Техническая характеристика дозаторов типа ДЗ приведена в табл. 3.6.

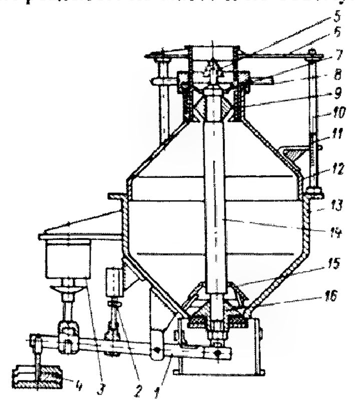


Рис. 3.5. Объемный дозатор для абразивного зерна:

1 — рычаг; *2* — конечный выключатель; *3* — электромагнит; *4* — груз; *5*, *7*, *15* — экраны; *6* — корпус; *8* — гайки; *9*, *16* — клапаны; *10* — колонка; *11* — шкала; *12*, *13* — воронки; *14* — шток

Около 3/4 всех материалов, применяемых в процессе приготовления формовочных

Таблица 3.6

Техническая характеристика дозаторов типа ДЗ

Техническая характеристика	Типы дозаторов							
	ДЗ-10	ДЗ-20	ДЗ-30	ДЗ-45	ДЗ-60	ДЗ-80	ДЗ-100	ДЗ-125
Вместимость, дм^3	9–15	16–25	25–30	38–50	53–65	70–90	80–115	112–150
Масса порции зерна электрокорунда, кг:								
минимальная	16	24	44	66	94	122	140	200
максимальная	26	44	61	88	115	158	200	260
Масса порции зерна карбида кремния, кг:								
минимальная	13	20	35	53	73	98	112	180
максимальная	21	35	49	70	90	130	180	210
Габаритные размеры дозатора (длина × ширина × высота), мм	620 × 365 × 527	630 × 410 × 700	690 × 470 × 700	800 × 540 × 900	840 × 540 × 1000	970 × 640 × 1130	1040 × 730 × 1145	1130 × 780 × 1195
Масса дозатора, кг	52	62	70	105	110	200	235	280

смесей (микропорошки, связки, сухой декстрин), дозируются на весах различных конструкций и классов и с помощью весовых дозаторов. При дозировании трудносыпучих материалов (смесей и их компонентов), обладающих низкой подвижностью, используются автоматические дозировочные весы ДА-10. Эти весы стационарные, неравноплечие, они снабжены установкой дистанционного управления и механическим пятизначным счетчиком числа взвешиваний (числа навесок). Размер порции задается на пульте управления. Весы могут работать в автоматическом режиме.

Для дозирования низковязких жидких материалов применяют однопозиционные объемные дозаторы типа ДЖ [160], обеспечивающие высокую точность дозирования и широкий предел регулирования дозы. Они герметичны, что исключает контакт с окружающей средой таких жидкостей, как жидкое стекло, жидкий бакелит и др. Дозаторы типа ДЖ-5 и ДЖ-12,5 предназначены для дозирования компонентов "вязкостью" до 40 с, а дозатор ДЖ-5 – для воды.

Опыт эксплуатации дозаторов жидкости на абразивных заводах показал, что они надежны в работе, просты в обслуживании и обеспечивают стабильность выдаваемых порций жидкого компонента.

Схема дозатора представлена на рис. 3.6, а характеристика дозаторов типа ДЖ приведена в табл. 3.7 [160].

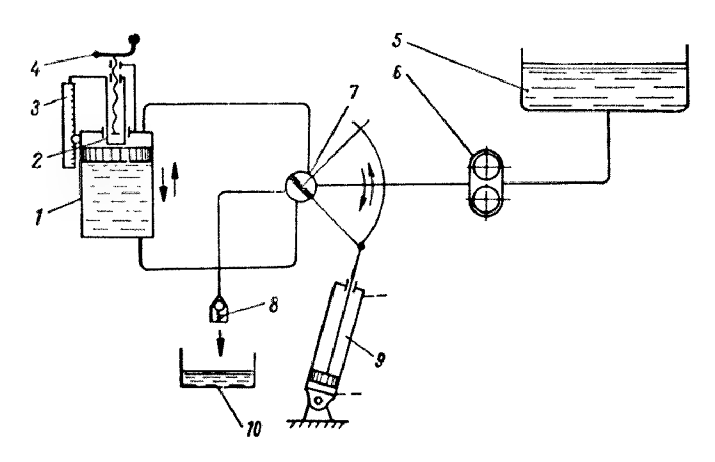


Рис. 3.6. Схема дозатора ДЖ:

1 — дозирующий цилиндр с бесштоковым поршнем; *2* — подвижный упор; *3* — линейка мерная; *4* — маховик; *5* — расходная емкость; *6* — насос; *7* — кран управления; *8* — кран для слива жидкости; *9* — пневмоцилиндр; *10* — приемная емкость

Таблица 3.7

Техническая характеристика дозаторов типа ДЖ

Техническая характеристика	Модель дозатора		
	ДЖ-0,5	ДЖ-5	ДЖ-12,5
Максимальная доза, дм³	0,5	5	12,5
Предел регулирования выдаваемой дозы, дм³	0,2–0,5	1–5	4–12,5
Цена деления шкалы, дм³	0,1	0,1	0,1
Точность дозирования, %	0,5	0,5	0,5
Рабочее давление дозируемой жидкости, Па	От водопроводной сети	5,105; от насоса	5,105; от насоса
Мощность электродвигателя, кВт	–	2,2	2,2
Время выдачи максимальной дозы, с	50	50	50
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	420 × 350 × 1120	620 × 460 × 1450	620 × 460 × 1600
Масса дозатора, кг	130,0	340,0	350,5

Смешивание формовочных смесей

Смешивание должно обеспечить равномерное распределение связки между абразивными зернами, что достигается определенной последовательностью загрузки смесительной машины составными частями формовочной смеси и временем смешивания при условии использования соответствующего смесителя.

При смешивании в смесительную машину вначале загружаются абразивное зерно и вода, затем клеящее вещество, которое смачивает это зерно доста-

точно равномерно; далее к смоченному зерну прибавляется связка, которая прилипает к нему благодаря клеящим свойствам увлажнителя, и затем сухой декстрин. Загрузка смесительной машины компонентами смеси осуществляется в процессе его работы через определенные промежутки времени. Общая продолжительность смешивания зависит от ряда факторов, и главным образом от величины зерна (зернистости) и конструкции смесителя. Мелкозернистые смеси, как правило, требуют более продолжительного смешивания.

В табл. 3.8 приведены данные по времени смешивания формовочных смесей в зависимости от зернистости абразивных материалов различных марок.

Работа смесительного аппарата должна гарантировать получение однородной смеси, в которой не должно быть ни скоплений частиц (комков), ни удаления частиц связки с поверхности абразивных зерен, а перетирание частиц массы должно быть сведено до минимума.

На отечественных заводах и заводах других стран СНГ при изготовлении формовочных смесей применяют лопастные и барабанные смесители [159].

Лопастные смесители используют для приготовления формовочных смесей из крупно- и мелкозернистого абразивного материала (50–М63), а барабанные смесители — как правило, для изготовления смесей из тонкозернистых абразивных материалов (М40–М7).

Лопастные смесители различают по форме чаши и виду привода, по форме лопастей и виду их движения, по способу загрузки. Чаши бывают цилиндрические, коробчатые и сферической формы, неподвижные и вращающиеся. Лопастные смесители, используемые для приготовления керамических смесей, в основном оснащены цилиндрическими чашами и прямыми лопастями, имеющими планетарное движение (типы СМ, МЛ, АПАМ и др.) [161, 162].

Наиболее рациональными смесителями следует считать смесительные машины, работающие по принципу противотока. Принцип противотока заключается в том, что при смешивании чаша мешалки вращается в одну сторону, а вал с лопастями в другую. По способу разгрузки лопастные смесители можно разделить на три группы: с ручной разгрузкой; с разгрузкой при повороте чаши; с разгрузкой через отверстие в дне чаши.

Таблица 3.8

Режимы смешивания компонентов формовочной смеси для различных абразивных материалов

Марка абразивного материала	Зернистость	Время смешивания, мин		
		1-й цикл (зерно + вода + + жидкое стекло)	2-й цикл (загрузка связки и сухого декстрина)	Общее время смешивания
25А	50–16	6 + 0,2	4 + 0,2	10 + 0,4
95А	12–10	10 + 0,2	6 + 0,2	16 + 0,4
14А	12–10 8–М63	10 + 0,2	10 + 0,2	20 + 0,4
63С	50–16	8 + 0,2 (зерно + раствор декстрина)	6 + 0,2	14 + 0,4
64С	12–10–8	10 + 0,2 (зерно + раствор декстрина)	8 + 0,2	18 + 0,4
64С	М63–М20	10 + 0,2 (зерно + вода)	10 + 0,2	20 + 0,4

Возможность выгрузки готовой смеси через дно чаши снижает попадание абразивной пыли в окружающую среду. Одновременно сокращается возможность производственного травматизма, связанного с непосредственным контактом рабочего с движущимися частями машины. Перемешивание формовочной смеси в смесительных машинах типа СМ осуществляется путем планетарного движения прямых гребенчатых лопастей и встречного вращения чаши цилиндрической формы, заполненной компонентами смеси. Этот принцип позволил увеличить производительность машины и повысить качество приготовления смеси [163, 164].

Характеристика лопастных смесительных машин типа СМ приведена в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Техническая характеристика лопастных смесителей

Техническая характеристика	Тип смесителя				
	СМ-50	СМ-100К	СМ-200К	СМ-400ИП	СМ-400У
Вместимость чаши, дм^3	50	100	200	400	400
Масса одного замеса, кг	32	62	125	250	250
Частота вращения, об/мин:					
чаши	26	23	21	19	19
лопастей	60	56	52	49	49
Угол разворота, град.:					
чаши	95	95	95	95	95
лопастей	90	90	90	90	90
Уровень разгрузки смеси, мм:					
через клапан	–	–	–	–	406
путем разворота чаши	520	740	800	915	880
Мощность электродвигателя, кВт	3,3	3,7	7,3	10,7	9,9
Габаритные размеры (длина × × ширина × высота), мм	1170 × × 594 × 1153	1250 × × 730 × 1373	1585 × × 925 × 1545	1945 × × 1180 × × 1670	1945 × × 1180 × × 1760
Масса, кг	982	1200	2185	2526	3100

Принципиальные конструктивные схемы машин типа СМ и компоновка их узлов одинаковы.

Существенным отличием всего ряда машин типа СМ обладает машина модели СМ-400У (рис. 3.7), имеющая клапан, позволяющий производить выгрузку готовой смеси не только методом разворота чаши, но и через ее дно. Наличие такого клапана в сочетании с разворотом чаши позволяет использовать смесительную машину модели СМ-400У как индивидуально, так и в составе массоприготовительного агрегата.

Применяющаяся на некоторых абразивных заводах смесительная машина типа АПАМ-300 (рис. 3.8) отличается от машин типа СМ тем, что имеет планетарные вращающиеся лопасти и невращающуюся чашу объемом 300 дм^3, которая выгружается при поднятых лопастях на протирочное устройство с помощью гидроцилиндра [162].

Для приготовления мелкозернистых смесей на керамических связках широко применяются смесительные машины типа МЛ-50 и МЛ-100 (рис. 3.9).

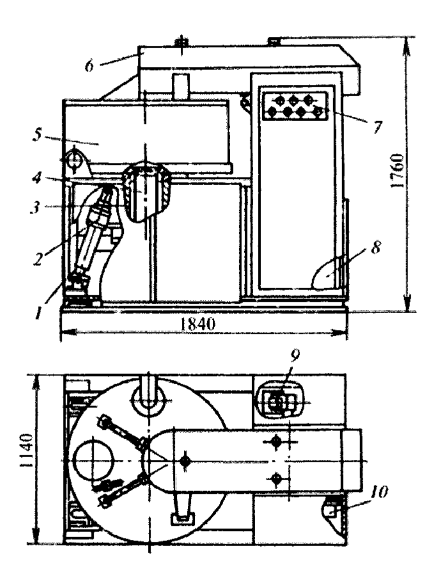


Рис. 3.7. Универсальная смесительная машина СМ-400У:

1 — сварная станина; *2* — чаша; *3* — полый вал; *4* — гидроцилиндр управления загрузочного отверстия; *5* — привод чаши; *6* — лопасти с приводом; *7* — пульт управления; *8* — гидростанция; *9* — гидроцилиндр поворота лопастей; *10* — шкаф с электрооборудованием

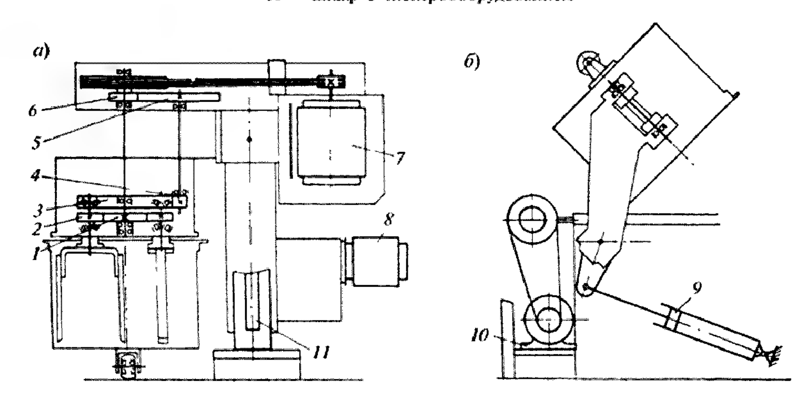


Рис. 3.8. Кинематическая схема смесительной машины модели АПАМ-300:

а — рабочее положение; *б* — положение при разгрузке; *1–6* — шестерни привода лопастей; *7* — гидроцилиндр подъема лопастей; *8* — электродвигатель протирочного устройства; *9* — электродвигатель привода лопастей; *10* — станина; *11* — гидроцилиндр поворота чаши

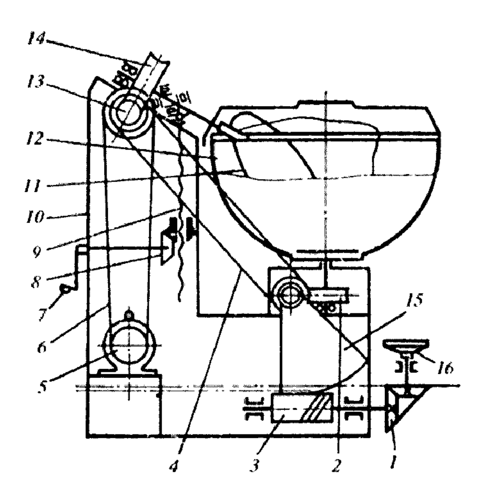


Рис. 3.9. Кинематическая схема смесителя модели МЛ-100:

1, 8 – пара конических шестерен; *2, 14* – червячные редукторы; *3, 13* – червяки; *4, 6* – клиноременные передачи; *5* – электродвигатель; *7* – рукоятка; *9* – винт для перемещения лопасти; *10* – станина; *11* – литая лопасть; *12* – чаша сферической формы; *15* – сектор червячного колеса; *16* – маховик

Конструкция этих машин практически одинакова. Время смешивания предварительно устанавливается по реле времени, которым снабжена машина. Машина имеет вращающуюся чашу, внутри которой расположена литая лопасть криволинейной формы. Чаша закрывается съемной крышкой; после окончания цикла смешивания и снятия крышки лопасти выводятся из чаши, а чаша поворачивается для выгрузки смеси. Зачистку чаши и лопасти производят после каждого цикла смешивания. В конце смены чашу и лопасть промывают горячей водой. Машина также подвергается промывке при переходе на приготовление смесей, содержащих более мелкие зерна и порошки.

Мелкозернистые смеси (из микропорошков зернистостью М63–М20) в силу своих особенностей требуют более продолжительного времени смешивания. Учитывая это обстоятельство, смешивание мелкозернистых формовочных смесей производят в шаровых барабанах с керамической, резиновой и другими видами футеровки, обеспечивающей отсутствие намола железа в формовочную смесь. Применение в качестве смесительного агрегата шарового барабана кроме смешивания позволяет обеспечить дополнительное измельчение связки. Для смешивания применяют уралитовые или фарфоровые шары диаметром 20–40 мм. Отношение массы шаров к массе абразивной смеси принимается 1 : 3. Последовательность загрузки компонентов смеси следующая: микропорошок + связка + сухой декстрин. Отвешенные по рецепту компонен-

ты через загрузочное отверстие барабана подаются в барабан, затем загружают необходимое количество шаров. Загрузочное отверстие барабана закрывают крышкой с резиновой прокладкой, исключающей возможность высыпания смеси из барабана в процессе смешивания. Время смешивания в барабане 2,5–4,5 ч. К недостаткам такого вида оборудования относится большая запыленность рабочего пространства во время загрузки и выгрузки из барабана, а также длительность процесса смешивания.

Осмотр барабана производят через каждые пятнадцать дней, проверяют состояние футеровки.

Характеристика барабанных смесителей представлена в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Техническая характеристика барабанных смесителей

Техническая характеристика	Тип смесителя	
	БШ-300	БШ-600
Емкость барабана, дм^3	300	600
Масса загружаемой формовочной смеси, кг	200	400
Диаметр кремневых шаров, мм	50–60	50–60
Масса загружаемых шаров, кг	75	150
Частота вращения барабана, об/мин	29	29
Продолжительность процесса, ч:		
смешивания	2,5–4,5	2,5–4,5
выгрузки	0,3	0,3
Производительность барабана в смену, т	0,5	0,8
Мощность электродвигателя, кВт	2,3	4,5
Размеры барабана (диаметр × длина), мм	800 × 820	1000 × 1000
Габаритные размеры установки (длина × ширина × высота), мм	2800 × 2285 × 1740	2990 × 2415 × 1900
Масса барабана без шаров, кг	3000	3200

После смешивания формовочной смеси в барабанных смесителях производят ее увлажнение в смесительных машинах типа СМ или АПАМ-300.

В результате опытно-конструкторских и исследовательских работ, проведенных в СПКО "Оргтехстрой", для смешивания мелкозернистых масс был создан новый смеситель — смеситель-активатор со спирально-вихревым потоком смеси (типа ССВ), превосходящий существующие по скорости перемешивания в 3–15 раз и по однородности готовой смеси в среднем в 2,5 раза [165, 166].

Схема смесителя типа ССВ представлена на рис. 3.10.

В конструкцию смесителя (см. рис. 3.10) входит емкость *6* из эластичного материала с жестким ободом *5* в верхней части и смешивающим диском *4* с кольцевым желобом *3*, закрепленными в днище. Емкость установлена на поворотной раме *7*. Колебания сообщаются емкости от вертикально расположенного электродвигателя *11* через шкивы, клиновые ремни и смешивающий диск.

Готовый продукт выгружается опрокидыванием емкости с помощью поворотной рамы на полуосях *2*, закрепленных на основной раме *1*. Для опрокидывания емкости служат электродвигатель *10*, редуктор *9*, пара зубчатых цилиндрических шестерен и фиксатор *8*.

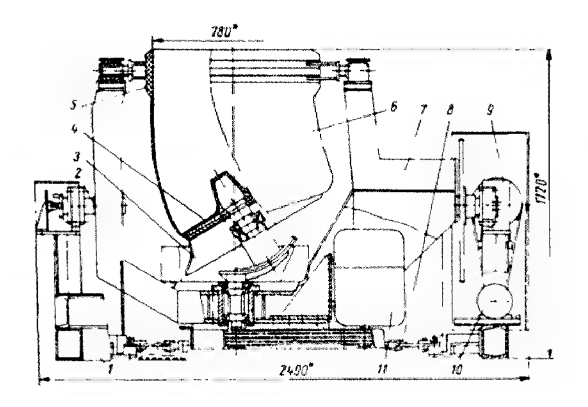


Рис. 3.10. Схема смесителя модели ССВ:

1 — основная рама; *2* — полуоси; *3* — кольцевой желоб; *4* — смешивающий диск; *5* — жесткий обод; *6* — емкость из эластичного материала; *7* — поворотная рама; *8* — фиксатор; *9* — редуктор; *10* — электродвигатель опрокидывателя; *11* — электродвигатель

Смеситель не имеет быстроизнашивающихся узлов и деталей механизма смешивания.

Техническая характеристика смесителя ССВ-0,1П и шарового барабана представлена в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Техническая характеристика смесителя ССВ-0,1П и шарового барабана

Техническая характеристика	Тип смесителя	
	Смеситель ССВ-0,1П	Шаровой барабан
Загрузка смесителя, кг	100	130
Установленная мощность электродвигателя, кВт	4,6	1,6
Время смешивания, ч	0,2–0,3	4–6
Площадь смесителя, м²	5	16
Масса смесителя, кг	1500	1340

Указанные смесители работали на одном из заводов абразивной отрасли при изготовлении мелкозернистых смесей из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого. Время смешивания по сравнению с шаровыми барабанами сократилось до 10—20 мин при резком увеличении качества смешивания (при однородности получаемой смеси), что привело к изготовлению изделий с равномерной твердостью.

Рыхление (протирка) формовочных смесей

Все формовочные смеси после приготовления их в смесительных машинах или после увлажнения подвергают протирке через сетку с определенным размером ячейки (протирочная машина типа "грохот") (рис. 3.11). На рис. 3.12 представлен участок рыхления формовочных смесей на вибрационных ситах.

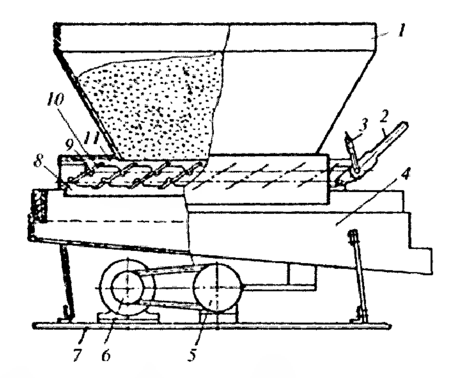


Рис. 3.11. Общий вид специальной протирочной машины:

1 — основание машины; *2* — электродвигатель; *3* — вибратор; *4* — сито; *5* — рычаг поворота; *6* — стопор; *7* — бункер; *8* — регулирующее приспособление; *9* — питатель пластинчатый; *10* — ось поворота пластины; *11* — тяга



Рис. 3.12. Участок рыхления формовочных смесей

Формовочная смесь готовится из расчета использования ее в течение смены. Качество смеси должно удовлетворять следующим требованиям:

иметь заданную влажность в пределах 2–3,5 %;

не содержать посторонних включений;

сохранять сыпучее и рыхлое состояние, при сжатии ее в руке должна уплотняться и сохранять приданную ей форму при разжатии руки.

Прошедшая через протирочный грохот формовочная смесь попадает в кюбели и подается к прессам на участок формования изделий.

3.3. Формование абразивных изделий

Формование представляет собой процесс получения из формовочной смеси заготовки абразивного инструмента, близкой по форме и размерам к готовому изделию и обладающей равномерной плотностью по всему объему и прочностью, достаточной для сохранения целостности заготовки при ее извлечении из формующей полости, при ее транспортировке и последующей обработке.

В настоящее время в технологии изготовления абразивного инструмента на керамической связке применяются следующие методы формования:

прессование изделия под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение абразивной смеси за счет уменьшения объема пор, повышения удельной поверхности соприкосновения частиц формовочной смеси и увеличения текучести смеси, заполняющей формовочное пространство. Методом прессования изготавливают инструмент диаметром 40–1400 мм при влажности формовочных смесей 2–4 %;

шликерное литье (холодное литье), в котором используются жидкие суспензии влажностью 25–40 % с введением временного связующего для придания абразивным смесям способности приобретать заданную форму, плотность и прочность после обжига. Методом шликерного литья изготавливаются в основном абразивные бруски;

горячее литье под давлением, осуществляемое литьем шликеров, в состав которых входят термопластичные соединения (например, парафин в количестве 30–40 %). Прочность и качество изделий в этом случае определяются точностью и качеством пресс-форм для горячего литья. Этим методом изготавливаются изделия диаметром 0,5–20 мм как простой, так и сложной конфигурации.

Недостаток метода шликерного литья — сложность регулирования структуры изделия, поэтому метод прессования является наиболее рациональным и широко применяемым при производстве абразивного инструмента.

Формование абразивных изделий методом полусухого формования на гидравлических прессах в металлических пресс-формах производится с использованием специальных приспособлений и устройств, обеспечивающих, во-первых, получение инструмента необходимых и стандартных свойств, во-вторых, облегчение выполнения отдельных операций при формовании.

Весь процесс формования состоит из последовательно выполняемых операций: дозирования формовочной смеси, укладки формовочной смеси в прессформе с помощью разравнивающих машин или других приспособлений, прессования заготовок, съема заготовок и укладки их на полки сушильного вагона.

3.3.1. Дозирование формовочных смесей

При дозировании взвешивание навески может производиться на весах любой конструкции с применением автоматических весовых дозаторов, а также объемного дозирования с точностью, установленной для данного метода. Отклонение от заданной массы навески может привести к завышению или занижению твердости и к изменению структуры формуемого изделия. Так, например, если навеска взята больше, чем это необходимо, то изделия будут получены более плотной структуры и завышенной твердости; если же навеска мала, то изделия будут более открытой структуры и заниженной твердости.

Расчет навески на формуемый круг производят по формуле

$$P = \gamma V, \text{ кг},$$

где P — навеска (масса заготовки), кг; γ — объемный вес формуемой смеси (данные рецептуры), г/см^3; V — объем абразивного круга, см^3, равный $0{,}785(D^2 - H^2)t$ (D — диаметр круга, см, H — диаметр отверстия круга, см, t — высота круга, см).

Типы и конструкции весов, применяемых при весовом дозировании, весьма разнообразны и зависят от массы формуемой смеси.

При автоматическом весовом дозировании используют дозаторы, устанавливаемые под бункером пресса. Формовочная смесь посредством питателя подается в дозатор. По достижении навески, которая визируется на циферблатном указателе дозатора, подача формовочной смеси прекращается и подается сигнал на разгрузку смеси в пресс-форму. При неправильном взвешивании порции смеси производится коррекция массы навески с помощью специальных устройств.

Характеристика весовых дозаторов приведена в табл. 3.12.

Кроме весового дозирования применяется и объемное дозирование формовочных смесей, которое осуществляется путем свободного заполнения смесью заданного объема пресс-формы с помощью специальной кассеты либо подачей формовочной смеси в пресс-форму с помощью сжатого воздуха.

В этом случае операции дозирования и укладки формовочной смеси в пресс-форму совмещаются, и этим сокращается время операции. Объемное дозирование позволяет обеспечить равномерность распределения смеси в разных точ-

Таблица 3.12

Техническая характеристика весовых дозаторов

Техническая характеристика	Модели дозаторов	
	ДВСТ-2	ДВСТ-300
Полезный объем грузоприемного устройства, дм^3	19	270
Цикл дозирования, с	45	180
Допускаемая погрешность каждой навески, %	±1	± 0,5
Цена деления шкалы циферблата, кг	0,01	0,5
Мощность, кВт	0,6	1,8
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1150×1360×2260	2100×1660×3300
Масса, кг	286	680

ках объема пресс-формы с точностью в пределах ±(1–2) %. Погрешность объемного дозирования порции смеси несколько выше, чем весового, но не должно превышать ±(1–3) %.

Объемное дозирование и укладка формовочных смесей в пресс-форму с помощью сжатого воздуха применяются при изготовлении шлифовальных кругов прямого и фасонного профилей. Применение этого способа (особенно при изготовлении кругов фасонного профиля) позволяет по сравнению с весовым дозированием и ручной укладкой смеси сократить в два-три раза время дозирования и укладки и обеспечить равномерное распределение формовочной смеси в пресс-форме с точностью 0,3–0,5 %. Погрешность дозирования и укладки порции формовочной смеси в пресс-форму с помощью сжатого воздуха составляет ±(0,5–1,5) % [167, 168].

Помимо указанных схем дозирования применяется пневматическое объемное дозирование (ПОД) — подача формовочной смеси в пресс-форму до заданного объема с удалением воздуха через пористую перегородку.

При формовании абразивные круги прессуются с припуском на механическую обработку, величина которого зависит от твердости, высоты и классности инструмента (А, АА). Чем мягче круг, меньшей высоты и более высокого класса (АА), тем больше припуски на обработку и больше расход абразивных материалов на одну тонну инструмента (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Припуски и допуски на высоты кругов прямого профиля при их прессовании, мм

Диаметр круга	Высота круга	Припуск на высоту при формовке		Допуск
		без гидроплиты	с гидроплитой	
125–200	6–13 14–100	+3 +3	+6 +5	±0,5 ±1,0
250	6–13 14–100	+3 +3	+6 +5	±0,5 ±1,0
300–350	6–10 11–13 14–100	+4 +3 +3	+6 +6 +6	±0,5 ±0,5 ±1,0
400–450	8–13 14–40 41–100	+5 +3 +3	+7 +6 +6	±0,5 ±1,0 ±1,0
500	10–20 21–40 41–80 81–100 101–150 200	+6 +4 +3 +4 +5 +7	+9 +8 +7 +8 +8 +8	±0,5 ±1,0 ±1,0 ±1,0 ±1,0 ±1,0
600	10–20 21–40 41–80 81–100 101–150 200	+6 +4 +3 +4 +5 +7	+9 +8 +7 +8 +8 +8	±0,5 ±1,0 ±1,0 ±1,0 ±1,0 ±1,0

Диаметр круга	Высота круга	Припуск на высоту при формовке		Допуск
		без гидроплиты	с гидроплитой	
750	25–33 34–39 40–100	+10 +8 +6	+12 +8 +8	±1,0 ±1,0 ±1,0
900	25–28 29–33 34–43 44–100	+11 +11 +11 +6	+13 +12 +9 +8	±1,0 ±1,0 ±1,0 ±1,0
1060	33–43 44 и выше	+11 +6	+13 +8	±1,0 ±1,0

Примечания: 1. Величина впадины на кругах, формуемых с гидроплитой, не должно превышать половины припуска на высоту.

2. При формовании без гидроплиты абразивных кругов 1 500 × 150 × 305 всех твердостей припуск принимать равным 20 мм.

На размер припусков влияют и другие факторы: технологическая схема производства инструмента, средства механизации и автоматизации, применяемое сырье, ассортимент инструмента, транспортные средства и т. д., а также технологическая дисциплина.

Распределение формовочной смеси в пресс-форме

Для получения качественного абразивного инструмента, однородного по своим свойствам, без дефектов, весьма важным является равномерное распределение формовочной смеси в пресс-форме. Так как формовочная смесь обладает малой текучестью и сама при прессовании равномерно не распределяется в пресс-форме, то в местах, где смеси будет сосредоточено больше (или меньше), степень уплотнения также будет больше (или меньше), т. е. твердость инструмента будет неравномерной (завышение в толстом слое и занижение в тонком). Кроме того, неравномерное распределение формовочной смеси в пресс-форме приводит к неравномерной структуре в обожженном изделии и к неуравновешенности круга (дисбалансу), что ведет к непригодности изделия для эксплуатации.

При ручном разравнивании формовочной смеси в пресс-форме применяют шпильковые "равнялки" (рис. 3.13) [7].

Механизированный способ укладки формовочной смеси достигается за счет применения разравнивающих машин, которые встраиваются в установку для прессования. Первая разравнивающая машина, в которой все ручные операции механизированы [169, 170], была разработана Н.Ф. Волыниным (рис. 3.14).

Укладка смеси в пресс-форму ведется с помощью устройства, которое подает формовочную смесь в две точки пресс-формы (по диаметру) и разравнивает слой смеси с помощью специальной головки, имеющей две спиральные лопасти. Головка имеет подъемный механизм и может с нужной скоростью подниматься по мере увеличения слоя смеси. На рис. 3.15 представлена

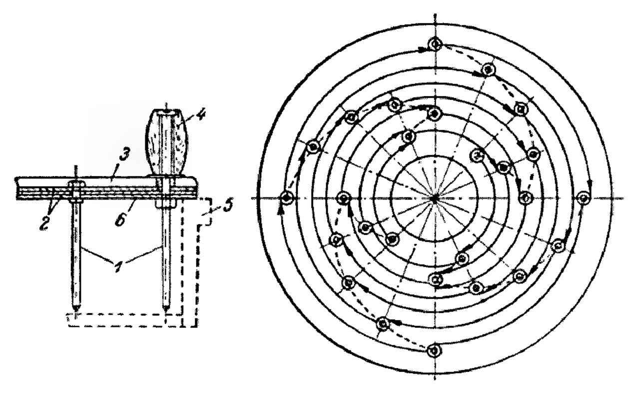


Рис. 3.13. Шпильковая "ровнялка":
1 — штыри; *2* — металлические листы; *3* — ограждение;
4 — ручка; *5* — пресс-форма; *6* — металлический диск

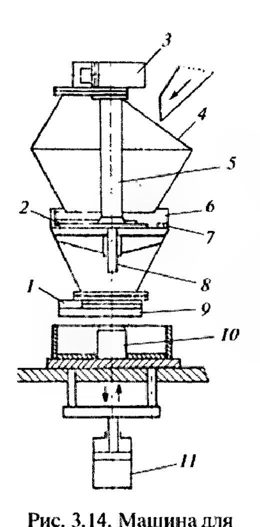


Рис. 3.14. Машина для укладки формовочной смеси в пресс-форму:

1 — лемех; *2* — диск (дно бункера); *3* — привод; *4* — бункер; *5* — тубус; *6* — воронка; *7* — фигурный нож; *8* — шпиндель; *9* — лопасть; *10* — пресс-форма; *11* — гидроцилиндр

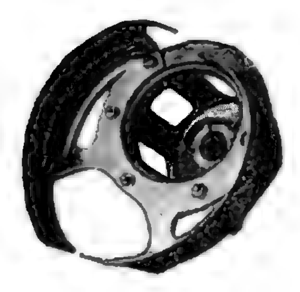


Рис. 3.15. Общий вид головки шпинделя машины для укладки и разравнивания формовочной смеси

головка шпинделя разравнивающей машины, имеющая разравнивающую спираль. Зазор между спиралью и оправкой или между спиралью и кольцом в зависимости от диаметра пресс-формы принимают равным от 10 до 15 мм. С увеличением диаметра круга следует принимать большую величину зазора.

Применение машин для равномерного распределения формовочной смеси в пресс-форме особенно необходимо при изготовлении кругов больших диаметров, а также кругов с малыми высотами, в основном прямого профиля.

Н.Ф. Волыниным разработана также разравнивающая машина, позволяющая укладывать и разравнивать две разные формовочные смеси [170].

На отечественных абразивных заводах в настоящее время работают различные модели разравнивающих машин, в том числе и те, конструкция которых предложена специалистами абразивных заводов.

Таблица 3.14

Техническая характеристика машин типа "ПОД" для дозирования и укладки формовочной смеси

Техническая характеристика	Тип машины		
	УК-16	УК-17	УК-18
Производительность, шт. / час	90–250	70–200	50–140
Диаметр круга, мм:			
наружный	125–250	250–350	400–600
внутренний	32–75	75–127	127–305
Высота круга, мм	10–63	10–63	20–63
Продолжительность цикла, с	До 20	До 20	До 20
Вместимость (объем) камеры, л	25	30	140
Рабочее давление воздуха, Па	$(2–4)10^5$	$(2–4)10^5$	$(2–4)10^5$
Мощность электродвигателя, кВт	17	17	17
Габаритные размеры (длина × ширина × × высота), мм	2385 × 950 × 3905	1385 ×950 × 3905	1600 × 1035 × 4125
Масса машины, кг	3500	3600	4000

Существуют машины типа "ПОД" (пневматическое объемное дозирование) для дозирования и укладки формовочной смеси в пресс-форму с помощью сжатого воздуха. Характеристика этих машин приведена в табл. 3.14.

3.3.2. Прессование

Прессование полусухой формовочной смеси, содержащей 2,5–4,0 % влаги, производится в пресс-формах и подчиняется общим закономерностям процесса прессования порошковых материалов, развитых Р.Я. Попильским и Ю.Е. Пивинским [171].

Уплотнение формовочной смеси обеспечивается более плотной укладкой частиц, а прочность сырца — составом связок и увлажнителями.

Изменение объема формовочной смеси при формообразовании характеризуется коэффициентом спрессовывания K_c, показывающим, во сколько раз высота насыпной разровненной формовочной смеси более высоты запрессованного изделия, и определяется по формуле

$$K_с = H_{нас}/H_{изд},$$

где $H_{нас}$ — высота насыпной разровненной формовочной смеси до прессования, мм; $H_{изд}$ — высота запрессованного изделия, мм; $K_с$ — коэффициент спрессовывания.

Формовочная смесь в зависимости от зернистости, вида шлифовальных материалов и содержания связки обладает различной рыхлостью. Коэффициент спрессовывания $K_с$ изменяется в зависимости от давления при прессовании. С учетом закономерности поведения формовочной смеси рекомендуется первый этап прессования производить при помощи насоса низкого давления со скоростью перемещения плунжера примерно 30–50 м/с, а окончательное прессование — второй этап — насосом высокого давления (скорость перемещения плунжера — от 2 до 4 мм/с). Для крупнозернистых изделий $K_с$ = 1,6–1,8, а для мелкозернистых $K_с$ = 2,5–2,8.

Для получения изделия требуемой высоты навеску формовочной смеси засыпают в пресс-форму и подвергают прессованию методом "до упора" или "до определенного постоянного давления". В первом случае при сборке формы необходимо подобрать плиты (верхнюю и нижнюю) и кольца с такими высотами, значения которых удовлетворяли бы следующему уравнению:

$$T = H - (h_в - h_н),$$

где T — заданная высота изделия (круга), мм; H — высота кольца, мм; $h_в$ — высота верхней плиты, мм; $h_н$ — высота нижней плиты, мм.

При прессовании "до упора" обе плиты входят целиком в кольцо пресс-формы. Для обеспечения этого на верхнюю плиту укладывается прижимная плита, диаметр которой равен диаметру кольца или несколько больше диаметра формовочной плиты. Конец прессования определяется моментом соприкосновения (упора) прижимной плиты с торцем кольца. Пользуясь указанным методом, изделие всегда будет получаться с постоянной высотой при разных давлениях. Но применение этого метода формования ограничено, поскольку завышение давления при прессовании часто приводит к деформации и разрушению кольца пресс-формы. Чтобы избежать этого, в конструкциях гидропрессов иногда предусматривается соответствующее приспособление "высотомер" для автоматического выключения пресса в момент, когда плунжер пресса поднимется (или опустится) на определенную высоту. Этим достигается прессование изделий всегда определенной высоты.

При использовании метода прессования "до постоянного давления" следует предварительно установить (по показаниям манометра) то давление, которое должно быть применено для получения изделия определенной (заданной) высоты.

С этой целью в рецептуре формовочных смесей обычно указывается необходимое удельное давление для получения изделий определенной характеристики, рассчитываемое по формуле

$$P = \frac{D_{кр}^2 - H^2}{D_{пл}^2}\rho, \text{ кг/см}^2,$$

где P — рабочее давление (по показаниям манометра), кг/см^2; $D_{кр}$ — диаметр абразивного круга, см; H — диаметр отверстия круга, см; $D_{пл}$ — диаметр плунжера, см; ρ — удельное давление, кг/см^2.

Подсчитав величину давления, производят пробное прессование в соответствии с показаниями манометра. У первого заформованного изделия замеряется высота, и если она меньше или больше заданной, то для прессования последующих изделий соответственно уменьшают или увеличивают давление. При прессовании до постоянного давления диаметр прижимной плиты должен быть равен или несколько меньше диаметра формовочной плиты.

При прессовании весьма существенное значение имеет скорость прессования смеси, равная скорости движения плунжера пресса.

При высокой скорости прессования из формовочной смеси не успевает удаляться воздух, что приводит к браку изделия ("расслоение"). Для мелкозернистых формовочных смесей скорость прессования должна быть ниже, чем для крупнозернистых смесей.

Прессование должно осуществляться последовательно, с применением сначала низкого давления в целях постепенного удаления воздуха, находящегося в формовочной смеси, затем высокого давления, обеспечивающего формовку изделия нужной плотности.

При формовании абразивных изделий малой высоты применяют одностороннее прессование, т. е. прессование без подпрессовки. В этом случае нижняя формовочная плита не перемещается относительно стенок пресс-формы (рис. 3.16).

При одностороннем прессовании формовочных смесей часть усилия прессования передается через кольцо пресс-формы на плиту пресса. Этим объясняется возникновение сил трения $F_{тр}$ между формовочной смесью и стенкой кольца пресс-формы. В итоге на нижний пуансон передается усилие, меньшее на значение силы трения. По этой причине в процессе прессования участки изделия, прилегающие к верхнему пуансону имеют бо́льшую плотность, чем нижние. Так как неравномерная плотность круга вызывает его неравномерный износ, то для выравнивания плотности по высоте применяется прессование с подпрессовкой или двухстороннее прессование, которое осуществляется по трем основным схемам, влияющим на конструкцию пресс-формы.

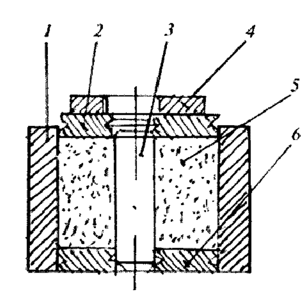


Рис. 3.16. Пресс-форма (до прессования):
1 — кольцо; *2* - верхняя формовочная плита; *3* — оправка; *4* — дополнительная плита; *5* — формовочная смесь; *6* — нижняя формовочная плита

По схеме I прессование производится верхней и нижней формовочными плитами при неподвижных стенках пресс-формы. Движение плит может быть как одновременным, так и поочередным. По такой схеме работают, например, механические прессы.

По схеме II прессование с подпрессовкой выполняется с применением подкладок в виде металлических пластин. Опытным путем установлено, что высота металлической пластинки $h_{пл}$ может быть выражена следующим равенством:

$$h_{пл} = h/2,8,$$

где h — высота свободно насыпанной в пресс-форме смеси, что составляет около 20 % высоты формовочной смеси.

По этой схеме, как правило, прессуются заготовки высотой 100 мм и более [172, 173]. Непосредственно процесс осуществляется следующим образом. Под стенки пресс-формы устанавливаются подкладки, засыпается формовочная смесь, разравнивается и производится предварительное прессование, обеспечивающее такое уплотнение смеси, при котором стенки пресс-формы силой трения удерживаются на месте после удаления подкладок. При первом прессовании верхняя плита полностью входит в пресс-форму. После удаления подкладок происходит окончательное прессование, и в пресс-форму входят как нижняя, так и верхняя плиты. Применение подкладок сопряжено с неудобствами, и прежде всего с затратой лишнего времени на включение давления и извлечение подкладок. Кроме того, при снятии подкладок портится кольцо пресс-формы. Часто вместо подкладок применяются специальные приспособления для подпрессовки.

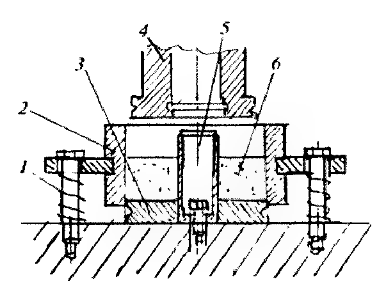


Рис. 3.17. Пресс-форма для формования с подпрессовкой при помощи действующих пружин сжатия:

1 — пружина сжатия; *2* — кольцо; *3* — нижняя формовочная плита; *4* — пуансон пресса; *5* — оправка; *6* — формовочная смесь

По схеме III изделия прессуются при неподвижной нижней формовочной плите и подпружиненных стенках пресс-формы.

Стенки пресс-формы могут быть подпружинены при помощи или горизонтальных кулачков, или вертикально действующих пружин сжатия (рис. 3.17). Движение подпружиненных стенок пресс-формы начинается самопроизвольно с того момента, когда возникающая сила трения формовочной смеси о стенки пресс-формы преодолеет сопротивление предварительной нагрузки пружин.

Принцип прессования по схеме III сохраняется, если, например, подпружинены оси тележки с пресс-формой или участок рельсового пути под прессом, по которому перемещается тележка с пресс-формой (рис. 3.18).

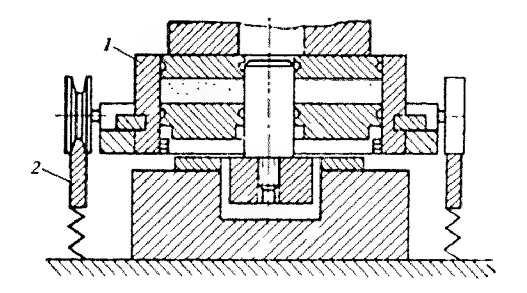


Рис. 3.18. Схема прессования с подпрессовкой при подпружиненном рельсовом пути:

1 — тележка с пресс-формой; *2* — подпружиненный рельсовый путь

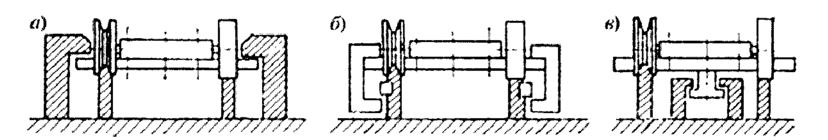


Рис. 3.19. Схема фиксации тележки при выталкивании и при обратном ходе ползуна пресса после прессования при усилии до 300 Н (*а*, *в*) и при усилии более 300 Н (*б*)

Фиксирование тележки в исходном положении во время выталкивания изделия из пресс-формы или во время обратного хода ползуна пресса при автоматическом прессовании может осуществляться по схемам, показанным на рис. 3.19.

Пресс-формы для автоматического прессования отличаются от обычных пресс-форм тем, что их верхняя формовочная плита крепится к траверсе пресса соосно с пресс-формой на позиции прессования.

При соблюдении технологического процесса (дозирование, разравнивание формовочных смесей, применение качественных пресс-форм и т. д.) очень сложно получить равномерную укладку формовочной смеси в пресс-форме по всему объему круга, особенно в кругах больших диаметров (400–1100 мм), и обеспечить современные требования по неуравновешенности инструмента (первый класс неуравновешенности по ГОСТ 3060–86). Кроме того, на получение неравномерной плотности большое влияние оказывает отсутствие необходимой жесткости и точности прессового оборудования.

Для устранения этого недостатка С.Г. Вороновым и В.А. Яшиным была предложена простая конструкция — гидроплита, которая встраивается в верхнюю формовочную плиту пресса [174]. Это устройство (рис. 3.20) было запатентовано во многих странах мира и до настоящего времени применяется на всех заводах России и других стран СНГ, обеспечивая выпуск кругов высокого класса А и АА по твердости и неуравновешенности.

Гидроплита представляет собой верхнюю формовочную плиту, которая состоит из гидроподушки, вклеенной в гнездо металлической обоймы (рис. 3.21).

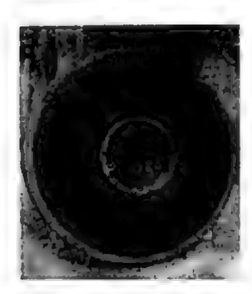


Рис. 3.20. Общий вид гидроплиты

Гидроподушка — полая резиновая плита, наполненная водой и изготовленная из сырой листовой протекторной резины марки ЧРЛ-660 по ГОСТ 2631–79 определенной толщины (для кругов диаметром 600–1100 мм — 5 мм, для меньшего диаметра — 4 мм).

Для изготовления гидроподушки лист резины раскраивают на две заготовки, которые укладывают в подготовленную металлическую форму (рис. 3.22) на 15–20 ч для придания резине нужного профиля, затем извлекают их из формы, срезают ножом края верхней и нижней заготовки под клин "на нет" по всей окружности периферии и отверстия заготовок. Срезанные концы очищают от жира, например, бензином и склеивают; шов склейки прокатывается роликом.

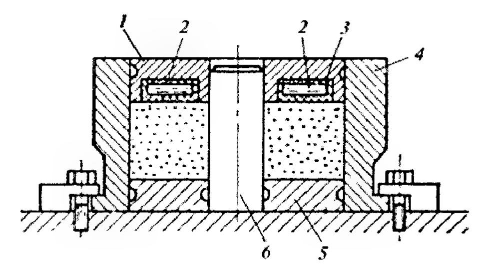


Рис. 3.21. Пресс-форма с гидроплитой:

1 — верхняя формовочная плита; *2* — резиновая камера; *3* — вода; *4* — кольцо пресс-формы; *5* — нижняя формовочная плита; *6* — оправка

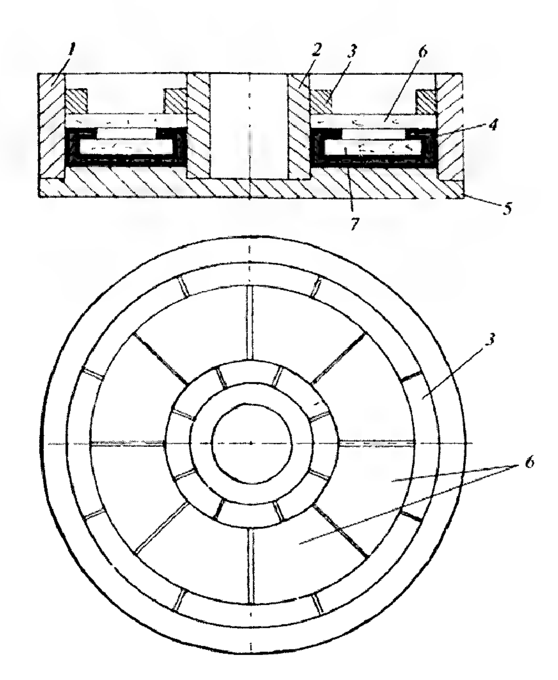


Рис. 3.22. Закладка нижней заготовки в форму:

1 — кольцо наружное; *2* — кольцо внутреннее; *3*, *6* — прижимные грузы; *4* — резиновая заготовка; *5* — нижняя плита; *7* — круг

Склеенную камеру наполняют воздухом, прокалывая периферию камеры иглой шприца; количество воздуха, вводимого в камеру, составляет 1,5–2 объема камеры. Затем камера укладывается в металлическую форму (рис. 3.23), которая устанавливается в сушильный шкаф для вулканизации. Режим вулканизации:

температура в сушильном шкафу при загрузке — 45 °С;

температура вулканизации — 160–150 °С;

выдержка при температуре вулканизации — 30 мин;

температура в шкафу при выгрузке формы — 30–40 °С.

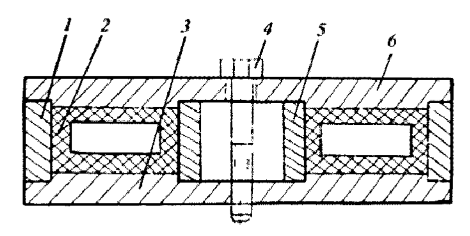


Рис. 3.23. Установка резиновой камеры в металлическую форму для вулканизации:

1 — кольцо; *2* — резиновая заготовка; *3* — нижняя плита; *4* — болт; *5* — керн; *6* — верхняя плита

По окончании вулканизации и остывании формы из нее извлекают камеру, прокалывают ее иглой, соединенной шлангом с вакуум-насосом для удаления из камеры воздуха, и затем заполняют ее водой, положив на лист стекла или оргстекла. При правильном наполнении камеры водой ее поверхность должна касаться поверхности стекла.

Вклеивание гидроподушки в гнездо металлической обоймы (рис. 3.24) производится клеем БФ-88.

Размеры гнезд обоймы должны соответствовать размерам гидроподушки. Гидроподушка должна помещаться в гнездо обоймы без зазоров. Коробление резины не допускается.

Поскольку давление жидкости внутри гидроплиты во все стороны передается одинаково, то при прессовании поверхность абразивного инструмента,

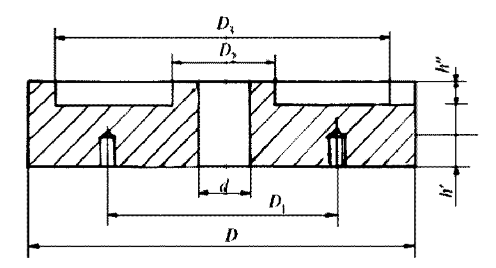


Рис. 3.24. Металлическая обойма для гидроподушки

соприкасающаяся с резиновой камерой, воспринимает одинаковое давление по всей поверхности абразивной смеси независимо от ее рельефа.

Верхняя формовочная плита, снабженная гидроподушкой, может быть закреплена на пуансоне пресса либо укладывается в форму вручную. Поверхность гидроплиты непосредственно обращена к поверхности формуемого изделия, на которую осуществляется давление, и, по закону Паскаля, позволяет осуществить одинаковое давление во всех ее точках, что обеспечивает получение одинаковой плотности, а следовательно, и равномерной твердости изделия.

В случае неравномерного распределения смеси, неправильно установленной оснастки или перекоса заготовок появляются выпуклости или вогнутости, которые удаляются при механической обработке прессованных изделий.

3.3.3. Прессы и формовочные агрегаты

Для прессования заготовок в абразивной промышленности применяются механические и гидравлические прессы с различным усилием (от 40 до 2000 т) в зависимости от размеров кругов, а также полуавтоматические и автоматические формовочных агрегаты на базе механических и гидравлических прессов.

К прессам и формовочным агрегатам предъявляются следующие требования: обеспечение требуемого давления; возможность регулирования хода, скоростей прессования и выталкивания; жесткость конструкции; простота системы смазки; удобное расположение механизмов управления и регулирования; достаточная производительность; надежность при эксплуатации.

Механические прессы общего назначения делятся на кривошипно-коленные и фрикционно-винтовые. Они применяются для прессования брусков и кругов диаметром до 150 мм. Кроме того, для этих же целей применяются формовочные прессы роторного типа с рычажной системой прессования. Как правило, на механических формовочных прессах, механических и формовочных агрегатах применяется объемное дозирование формовочной смеси.

К недостаткам механических прессов и формовочных агрегатов следует отнести чувствительность к перегрузкам, возможность поломки прессов и невозможность регулирования скорости движения ползуна.

Интерес представляют формовочно-роторные прессы модели ФПР, которые предназначены для формования шлифовальных кругов прямого профиля [175]. Пресс этой модели представляет собой четырехпозиционную карусельную машину роторного типа с двухсторонним (верхним и нижним) прессованием (рис. 3.25).

Высокие требования к качеству инструментов, формуемых на этих машинах, потребовали создания специальных прессов, существенно отличающихся от обычных прессов роторного типа. Призматические направляющие с устройством для компенсации зазоров при износе обеспечивают формование кругов в соответствии с техническими требованиями ГОСТ 4785—64. Индивидуальная настройка каждого ползуна в момент засыпки пресс-формы смесью позволяет получать изделия с отклонением от заданной навески в пределах ±1 %.

Прессы имеют сварную станину, внутри которой размещены вращающийся ротор с ползунами и пресс-формами, верхние и нижние прессующие ролики

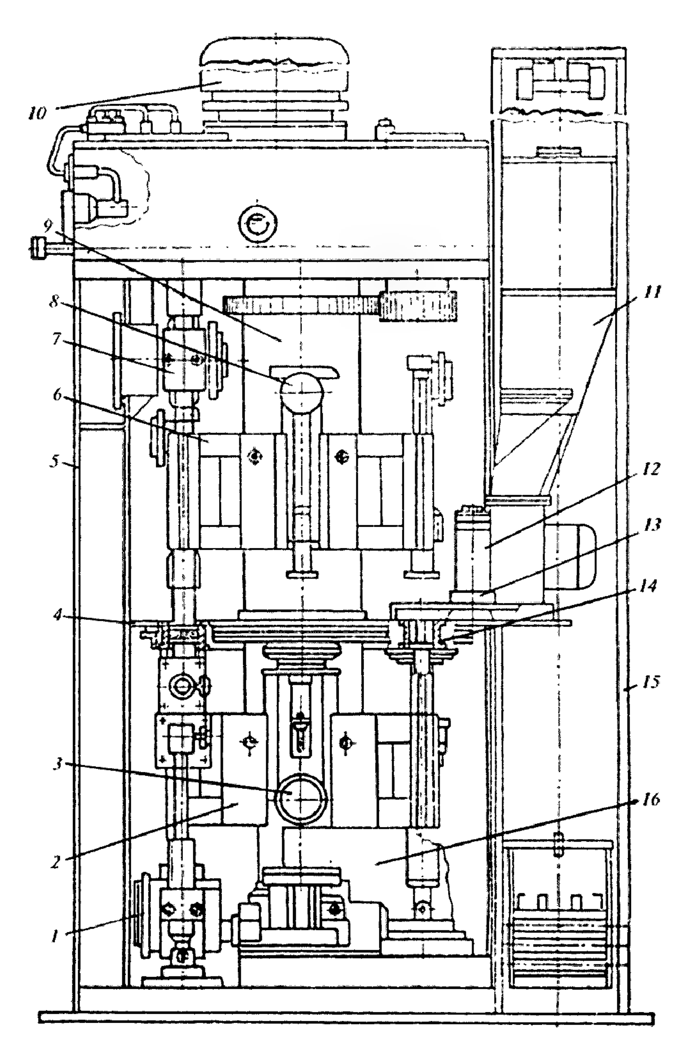


Рис. 3.25. Роторный пресс модели ФПР:

1 — прессующие ролики; *2*, *6* — направляющие для прессующих ползунов; *3*, *8* — прессующие ползуны; *4* — круглый стол с пресс-формами; *5* — станина; *7* — опоры (цапфы) ротора; *9* — ротор; *10* — привод ротора; *11* — загрузочный бункер; *12* — привод питателя; *13* — питатель; *14* — механизм подачи смеси в пресс-форму; *15* — скиповый подъемник; *16* — механизм перемещения ползунов

и кольцевые копиры. Ротор получает вращение от цилиндрического редуктора, установленного на верхней плите пресса. При вращении ротора ползуны с пуансонами получают вращательное движение, а за счет набегания боковых роликов на неподвижные, специально профилированные копиры — вертикальное перемещение и подаются под прессующие ролики.

Дозирование смеси производится питателем, закрепленным под вращающимся столом ротора. Формовочная смесь засыпается в бункер и крыльчаткой перемещается к пресс-форме. В этот момент нижний ползун с пуансоном перемещается вниз и формуемая смесь засыпается в освобождающийся объем пресс-формы. Такой способ заполнения пресс-формы исключает влияние высоты смеси в расходном бункере на точность дозирования смеси для изделия. Разгрузка питателя производится через окно в нижней части питателя. Двухстороннее симметричное прессование осуществляется сближением верхнего и нижнего ползунов над прессующимися роликами.

Применение твердых сплавов для изготовления пресс-форм позволило повысить их стойкость в 8–10 раз. Кроме того, они имеют значительно меньший коэффициент трения с абразивным зерном, чем пресс-формы из обычной стали, в результате чего осуществляется лучшее прессование кругов по высоте, а следовательно, достигается большая равномерность их твердости.

Основные технические характеристики прессов модели ФПР приведены в табл. 3.15.

Формование абразивных изделий диаметром более 200 мм осуществляется преимущественно на гидравлических прессах. Основные достоинства гидравлических прессов — малая чувствительность к перегрузкам, возможность

Таблица 3.15

Техническая характеристика прессов модели ФПР

Техническая характеристика	Тип модели				
	ФПР-3	ФПР-6	ФПР-16	ФПР-32	ФПР-63
Усилие прессования, МН	0,0315	0,063	0,016	0,315	0,630
Число прессформ в роторе, шт.	4	6	6	6	6
Размеры формуемых изделий, мм					
Наружный диаметр	8–25	30–50	60–80	90–110	125–150
Диаметр отверстия	3, 4, 6, 8	10, 13, 16	20	20	32, 51
Высота	6–32	16–40	16–50	20–52	13–50
Производительность, шт./ч	920–1210	1050	830	700	430
Цикл формования одного круга, с	1,78–2,35	2,05	2,60	3,1	5,0
Установленная мощность, кВт	1,5	4,0	5,5	10	10
Емкость бункера, дм^3	3	12	17	25	50
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1300 × 1200 × 1300	1600 × 1200 × 1300	2000 × 1200 × 2300	2200 × 1500 × 2300	2650 × 1975 × 4500
Масса пресса, кг	1300	3000	6285	10800	16000

достижения постоянной скорости движения ползуна и усилия прессования, плавность хода ползуна.

Типы гидравлических прессов по конструкции станины разделяются на рамные и колонные. У колонных прессов ползун перемещается на круглых направляющих колоннах-стойках.

Число колонн может быть равным трем или четырем. У рамных прессов конструкция станины может быть закрытой двухстоечной или открытой одностоечной (консольной).

Технические характеристики рамных прессов с верхним давлением усилием от 0,63 до 4 МН представлены в табл. 3.16, рамных прессов с нижним давлением усилием 1,25 и 20 МН — в табл. 3.17, а четырехколонных прессов усилием 3,15 и 6,3 МН — в табл. 3.18.

Таблица 3.16

Характеристики гидравлических прессов с верхним давлением и усилием 63—400 т

Техническая характеристика	Модель пресса				
	П-472Б	Д-2430Б	ПД-476	Д-2434Б	П-479
Номинальное усилие, МН	0,63	1,00	1,60	2,50	4,00
Усилие выталкивания, МН	0,0891	0,1250	0,2000	0,3150	0,5000
Перемещение, мм:					
подвижной траверсы	320	400	500	500	630
выталкивателя	160	200	250	250	320
Наибольшее расстояние между столом и ползуном (открытая высота), мм	630	710	800	1050	1300
Расстояние между стойками, мм	530	670	840	1050	1120
Размеры стола (длина × ширина), мм	500 × 500	630 × 630	800 × 800	1000 × 1000	1250 × 1250
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1120 × 930 × × 2300	1740 × 1175 × × 2780	1895 × 1180 × × 3000	2300 × 1000 × × 3200	2695 × 1250 × × 3940
Масса пресса, кг	1700	2570	2720	6690	10200

Примечание. Давление жидкости $200 \cdot 10^4$ Па.

Таблица 3.17

Техническая характеристика гидравлических рамных прессов с нижним давлением

Техническая характеристика	Модель пресса	
	ПАО-38 А	ПАО-33 А
Номинальное усилие, МН	12,5	20,0
Диаметр прессуемого изделия, мм	600–900	900–1400
Наибольшая высота прессуемого изделия, мм	300	200
Наибольшее перемещение стола, мм	600	500
Усилие двух формующих цилиндров, МН	1,8	1,8
Наибольшее расстояние между нижней и верхней плитами, мм	1410	1240

Техническая характеристика	Модель пресса	
	ПАО-38 А	ПАО-33 А
Расстояние между стойками пресса в свету, мм	1300	1780
Усилие, МН:		
выталкивателя	0,5	0,5
гидроподъемника	0,05	0,1
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	2630 × 300 × 3730	2950 × 324 × 3095
Мощность электродвигателя, кВт	75,0	83,4
Масса пресса, т	60,0	75,4

Таблица 3.18

Характеристика гидравлических четырехколонных прессов

Техническая характеристика	Модель пресса	
	ПО-30	ПО-31
Номинальное усилие, МН	3,15	6,30
Перемещение плунжера главного цилиндра, мм	400	500
Наибольшее расстояние между столом и ползуном (открытая высота), мм	800	850
Размеры стола (длина × ширина), мм	750 × 800	850 × 900
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1350 × 950 × 3740	1600 × 1100 × 4500
Масса пресса, кг	11000	18163

Примечание. Давление жидкости в сети $200 \cdot 10^5$ Па.

При выборе прессов соответствующей мощности следует знать, какое усилие необходимо для запрессовки изделия соответствующей плотности и твердости.

Для прессования абразивных кругов больших размеров или изделий значительной степени плотности (низких номеров структур и высоких твердостей) необходимо пользоваться прессами высокой мощности.

На рис. 3.26а и 3.26б показана зависимость удельного давления при прессовании от твердости, структуры и зернистости абразивного изделия. Чем выше твердость изготовляемого изделия, тем при более высоком давлении оно прессуется, более плотные структуры абразивных изделий требуют повышенного давления.

Абразивные изделия из карбида кремния по сравнению с электрокорундовыми изделиями прессуются при более высоком давлении. Чем выше номер зернистости SiC-материала, тем при меньшем давлении он прессуется.

Зная удельное давление и площадь прессуемого изделия, можно вычислить полное усилие при прессовании и, соответственно, необходимую мощность пресса:

$$N = pS/1000, \text{ т},$$

где N — полное усилие, т; P — удельное давление, кг/см^2; S — площадь изделия, см^2.



Рис. 3.26а. Характер изменения удельного давления при прессовании (в зависимости от твердости и структуры изготовляемых изделий):

1 изделия из карбида кремния шестой структуры; *2* - изделия из электрокорунда пятой структуры; *3* — изделия из электрокорунда шестой структуры

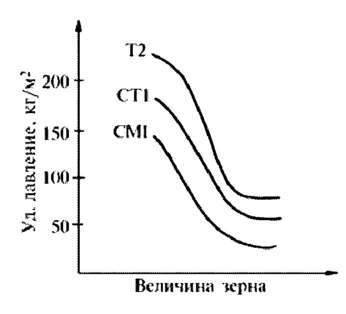


Рис. 3.26б. Характер изменения удельного давления при прессовании (абразивные изделия шестой структуры в зависимости от зернистости последнего в пределах № 46–120)

Так, например, для формования круга диаметром D = 450 мм с отверстием H = = 127 мм, у которого площадь равна 1463 см² при удельном давлении 150 кг/см², полное усилие при прессовании будет равно 220 т, и для этой цели должен быть применен пресс мощностью около 300 т. Если манометр пресса градуирован в атмосферах, то величина необходимого давления может быть вычислена по следующей формуле:

$$p = N \cdot 100/F, \text{ кг/см}^2,$$

где p — давление, кг/см²; N — полное усилие пресса, т; F — площадь сечения рабочего плунжера, см², или по формуле

$$p_{\text{уд}} = \rho S/F, \text{ кг/см}^2,$$

где $p_{\text{уд}}$ — удельное давление, кг/см²; S — площадь изделия, см²; F — площадь сечения рабочего плунжера, см².

Все операции на прессах выполняются специальными механизмами.

Схемы механизации прессов отличаются способом транспортировки пресс-форм с одной позиции на другую и возможностью совмещения во времени выполняемых технологических операций. Применяются следующие схемы механизации (рис. 3.27).

Первая схема — линейная однокомплектная двухпозиционная (см. рис. 3.27, *а*). На позиции *1* ведутся подготовка пресс-формы (очистка, смазка), укладка навески формовочной смеси или объемное дозирование в пресс-форму, выталкивание заформованного круга и его съем, на позиции *2* — прессование.

Площадь, необходимая для размещения пресса и узлов механизации, — 4 м², обслуживающий персонал — один человек.

Вторая схема — линейная однокомплектная трехпозиционная (см. рис. 3.27, *б*). На каждой позиции по этой схеме выполняются следующие операции: *1* — подготовка пресс-формы, взвешивание (объемное дозирование) и укладка формовочной смеси в нее; *2* — прессование; *3* — выталкивание изделия из пресс-формы и съем его.

Площадь, необходимая для размещения пресса, — 6 м², обслуживающий персонал — один человек.

Третья схема — линейная двухкомплектная двухпозиционная (см. рис. 3.27, *в*). На позициях *1* и *3* производятся подготовка пресс-форм, взвеши-

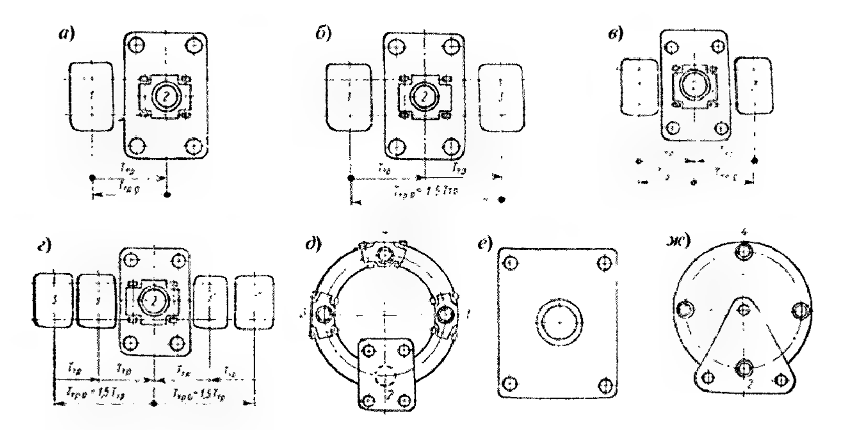


Рис. 3.27. Схемы механизмов прессов:

а — линейная однокомплектная двухпозиционная; *б* — линейная однокомплектная трехпозиционная; *в* — линейная однокомплектная двухпозиционная; *г* — линейная, двухкомплектная, трехпозиционная; *д* — кольцевая трех-, четырехкомплектная четырехпозиционная; *е* — однокомплектный однопозиционный автоматический формовочный агрегат; *ж* — четырехкомплектный четырехпозиционный автоматический формовочный агрегат с трехколонным гидравлическим прессом и поворотным столом

вание (объемное дозирование) и укладка формовочной смеси в пресс-форму, выталкивание заформованных изделий из пресс-формы и съем их с пресса, на позиции *2* — прессование. По такой схеме может осуществляться формование либо одинаковых изделий, либо отличающихся по высоте.

Площадь, необходимая для размещения пресса и узлов механизации, — 6 м^2, обслуживающий персонал — два человека.

Четвертая схема — линейная двухкомплектная трехпозиционная (см. рис. 3.27, *г*). На позициях *1* и *1'* производится подготовка пресс-форм, взвешивание (объемное дозирование) и укладка формовочной смеси в пресс-формы, на позиции *2* — прессование, на позициях *3* и *3'* — выталкивание изделий из пресс-форм и съем их с пресса.

Площадь, необходимая для размещения пресса и узлов механизации, — 10 м^2, обслуживающий персонал — два человека.

Третья и четвертая схемы (см. рис. 3.27, *в* и *г*) не дают значительных преимуществ по производительности по сравнению с первой и второй схемами (см. рис. 3.27, *а* и *б*), но для размещения требуют большой производственной площади. Уступают и по маневренности, так как требуют большего времени для переналадки пресс-оснастки.

Пятая схема — кольцевая трех-, четырехкомплектная четырехпозиционная (см. рис. 3.27, *д*). Перемещение пресс-форм по такой схеме осуществляется на тележках, которые передвигаются по кольцевым рельсам. На позиции *1* производятся взвешивание и укладка формовочной смеси в пресс-форму, на позиции *2* — прессование, на позиции *3* — выталкивание изделия из пресс-

формы и съем его с пресса, на позиции *4* — подготовка пресс-формы (очистка и смазка).

Необходимая площадь — 7 м². Пресс обслуживают три-четыре человека, по одному на каждую позицию. Преимущество этой схемы состоит в том, что все технологические операции выполняются одновременно.

Шестая схема — однокомплектный однопозиционный автоматический формовочный агрегат (см. рис. 3.27, *е*). При такой схеме расположения механизмов все технологические операции производятся на одной позиции: объемное дозирование и укладка формовочной смеси в пресс-форму, прессование, выталкивание изделия из пресс-формы и его съем.

Площадь, занимаемая агрегатом, — 2 м², обслуживающий персонал — один человек.

Седьмая схема — четырехкомплектный четырехпозиционный автоматический формовочный агрегат с трехколонным гидравлическим прессом и поворотным столом (см. рис. 3.27, *ж*). Эта схема, как и шестая, позволяет полностью автоматизировать процесс формования абразивных шлифовальных кругов.

На формовочном агрегате выполняются следующие операции: *1* — дозирование и укладка формовочной смеси в пресс-форму; *2* — прессование; *3* — выталкивание изделия из пресс-формы и его съем; *4* — опускание специальным приспособлением нижней формовочной плиты.

Площадь, занимаемая формовочным агрегатом, — 7,5 м², обслуживающий персонал — один человек.

Сопоставление схем формования кругов 1300 × 40 × 75 мм показало, что производительность при различных схемах формования составляет от 60 до 180 изд./ч. Минимальная производительность имеет место при линейной однокомплектной схеме механизации. Максимальная производительность достигается при формовании на четырехкомплектном четырехпозиционном формовочном агрегате с поворотным столом, на котором все технологические операции производятся одновременно.

Кроме гидравлических прессов, оснащенных механизмами и требующих участия оператора, разработаны и применяются в промышленности формовочные агрегаты, в которых все необходимые механизмы встроены в единый комплекс и выполняют свои функции без участия оператора. Такие формовочные агрегаты созданы на базе прессов усилием от 0,003 до 20 МН, оснащенных как весовым, так и объемным дозированием и пневмоукладкой формовочной смеси в пресс-форму. На базе пресса двухстороннего прессования усилием 0,003 МН создан формовочный агрегат (модель ПА-7), предназначенный для формования абразивных головок и кругов диаметром 8—36 мм, а на базе гидравлических прессов усилием 3,15 и 6,30 МН созданы автоматические формовочные агрегаты моделей АФА-1А, АФА-7, АФА-8 и АФА-9, обеспечивающие высокую производительность при массовом производстве абразивных изделий [176—178].

Формование кругов сложных профилей. Формование кругов сложных профилей (ЧК, ЧЦ и др.) диаметром до 150 мм представляет собой трудоемкий процесс с преобладанием ручных операций. Наиболее трудной операцией является укладка смеси в пресс-форму, которая в большинстве случаев производится ручной трамбовкой. Вследствие этого перепад твердости в разных точках изделия не укладывается в одну степень.

Формование кругов типа ЧЦ диаметром 125–250 мм производится при помощи приспособления с пневматической трамбовкой формовочной смеси. Работа приспособления основана на передаче давления от трамбовочной плиты, укрепленной на бойке пневматического отбойного молотка, на смесь, заполняющую цилиндрическую часть пресс-формы. Трамбовка формовочной смеси производится два раза, и после каждой трамбовки верхний слой смеси процарапывается шпилькой на глубину 5–10 мм. Время трамбовки зависит от зернистости и твердости формуемых кругов (2–5 мин): чем мельче зерно и больше твердость, тем больше время трамбования. После вторичной трамбовки формовочная смесь разравнивается, на нее кладут верхнюю рабочую плиту, форму передвигают под пресс и производят прессование до упора ("заподлицо").

Для улучшения качества кругов форм ЧК и ЧЦ была создана конструкция полуавтоматического агрегата (типа "ПОФАН"), основанная на пневматическом способе заполнения пресс-формы формовочной смесью, что обеспечивает равномерную ее укладку, а следовательно, равномерную плотность и твердость изделия.

Прессы типа "ПОФАН" — это, как правило, однопозиционные полуавтоматы с пневматической дозировкой формовочной смеси и гидравлическим способом прессования.

Формовочный агрегат представляет собой гидравлический пресс поршневого типа с нижним давлением, т. е. цилиндр с поршнем находится в неподвижной нижней траверсе пресса, а подвижной частью является стол пресса. Прессование происходит по высоте формуемого изделия, регулируется концевым выключателем, который дает команду на завершение прессования.

Полуавтомат обеспечивает изготовление изделий на одной позиции в автоматическом цикле, выполняя следующие операции:

1) заполнение надувной головки формовочной смесью до определенного уровня;

2) установление пресс-формы в положение надува;

3) надув по определенному времени;

4) прессование;

5) разъем пресс-формы;

6) выталкивание готового изделия;

7) обдув пресс-формы.

Схема управления прессом состоит из двух частей: схема управления скипом и схема автоматического управления прессом.

Формовочная смесь засыпается в ковш скипового подъемника, который по направляющим подается наверх, где автоматически высыпается в бункер. Дном бункера является диск тарельчатого питателя, дозирующий смесь через горловину в расходную емкость пресса до уровня, контролируемого электронным прибором.

Верхняя неподвижная траверса пресса имеет встроенный цилиндр (расходную емкость). На этом цилиндре расположены приборы, осуществляющие дозировку и укладку формовочной смеси в пресс-форму.

В расходной емкости смесь перемешивается лопастями, благодаря чему обеспечивается неслеживаемость смеси. По образующей цилиндра расположены два клапана: клапан надува, который в нужный по циклограмме момент

открывает доступ сжатому воздуху в цилиндр, и клапан, открывающийся по окончании заполнения пресс-формы формовочной смесью и одновременно выпускающий в атмосферу излишек воздуха из цилиндра.

При эксплуатации пресс-форм, применяемых в однопозиционных формовочных агрегатах модели "ПОФАН-160" для формования заготовок шлифовальных кругов типа ЧК и ЧЦ методом надува, наблюдается интенсивный выброс абразивных частиц в окружающее пространство и высокий уровень шума. Причина этих неблагоприятных явлений кроется в конструктивных особенностях пресс-формы (рис. 3.28, *а*).

Укладка формовочной смеси в матрицу пресс-формы производится потоком сжатого воздуха под давлением 0,2—0,3 МПа через полость А (пресс-форма при этом находится в разомкнутом состоянии). Отработанный воздух выходит в окружающее пространство через зазор между пуансоном *1* и матрицей *2* (см. рис. 3.28, *а*), увлекая за собой абразивные частицы, которые вылетают с большой скоростью и могут стать источником травматизма. Кроме того, для полного сброса давления необходимо длительное время, что снижает производительность пресса.

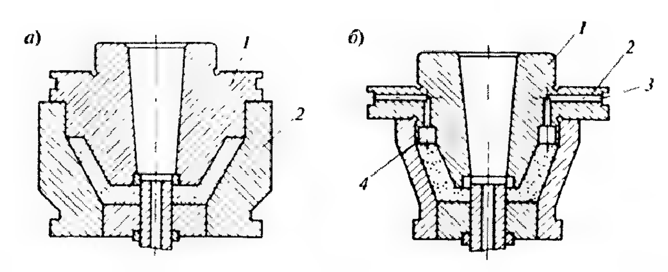


Рис. 3.28. Пресс-форма (*а*) (*1* — пуансон; *2* — матрица) и модернизированная пресс-форма (*б*) (*1* — пуансон; *2* — матрица; *3* — отверстия; *4* — фильтр)

Специалистами Косулинского абразивного завода разработана новая конструкция пресс-формы (рис. 3.28, *б*), предусматривающая в корпусе пуансона ряд отверстий *3*, через которые выбрасывается отработанный воздух, который дополнительно проходит через кольцевой пористый керамический фильтр *4*, выполняющий функции шумогасящего устройства [179].

Изготовление инструментов формы "Т". До настоящего времени изделия формы тарелок "Т" изготовлялись методом формования заготовок прямого профиля с последующей механической обработкой после обжига. Такой способ изготовления являлся трудоемким и малопроизводительным. ВНИИАШем была разработана профильная укладка смеси в форму с помощью сжатого воздуха, позволяющая после прессования получить однородное изделие в полуразмер. Для этого в пескострельной машине модели 305 была сконструирована специальная приставка *9* (рис. 3.29). Верхняя часть приставки имеет профиль, представляющий собой зеркальное изображение внутреннего профиля тарелки. Коэффициент уплотнения уложенной смеси в каждой точке

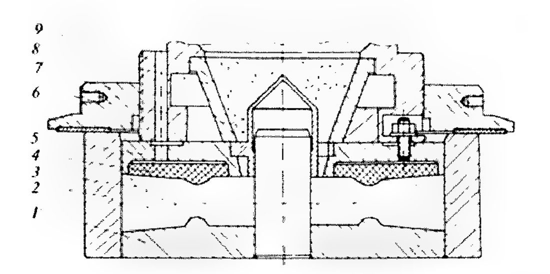


Рис. 3.29. Схема дозирования и укладки формовочной смеси в пресс-форму:

1 — плита формовочная; *2* — кольцо пресс-формы; *3* — формовочная смесь; *4* — плита керамическая; *5* — диск; *6* — стакан; *7* — гайка; *8* — конус; *9* — корпус приставки

пресс-формы одинаков, что позволяет после прессования получать однородные по плотности изделия.

Изготовление кругов диаметром 8–36 мм и шлифовальных головок. Для изготовления малогабаритных шлифовальных кругов и шлифовальных головок применяется формовочный агрегат модели ПА-7, принципиальная схема которого изображена на рис. 3.30.

Техническая характеристика формовочного агрегата:

Номинальное усилие, МН	0,03
Открытая высота, мм	70
Усилие выталкивателя, МН	0,0038
Производительность, шт./ч:	
на кругах 1 16	620
на кругах 1 36	310
Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	485 × 420 × 1000
Масса, кг	1200

Заполнение пресс-формы формовочной смесью объемное и производится подвижным питателем *13*, возвращение которого в исходное положение осуществляется цилиндром *12*. В этом положении подается команда на перемещение вниз штока цилиндра *3*, который через брус *1* и тягу *22* опускает малую верхнюю траверсу *14*, и закрепленные на ней керны *15* выходят из верхних пуансонов *16*. Как только брус *1* дойдет до нижней полки скобы *2*, начинают перемещаться вниз колонны *4* и траверса *17* с закрепленными на ней верхними пуансонами *16*. Когда пресс-формы будут перекрыты верхними пуансонами, дается команда на перемещение вверх штока гидроцилиндра нижнего прессования *5*. Поднимаясь вверх, шток перемещает малую нижнюю траверсу *9* и внутренние пуансоны *10*, которые прессуют вершину головки. Прессование пуансонами *10* продолжается до тех пор, пока плита *7* не подойдет к нижней траверсе *8*, после чего происходит совместное прессование снизу обоими пуансонами *10* и *11* до ограничительных регулируемых упоров *18*. Затем под давлением шток цилиндра *3* и брус *1* перемещаются вверх. Совместно с брусом

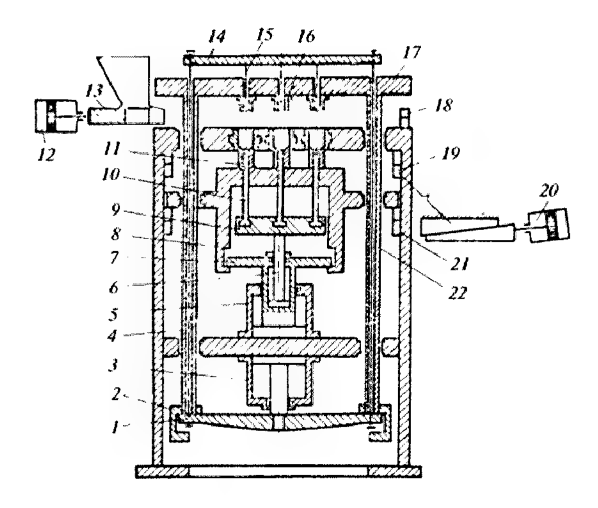


Рис. 3.30. Схема агрегата модели ПА-7
для формования головок:
1 — брус; *2* — скоба; *3* — цилиндр; *4* — колонны; *5* — гидроцилиндр нижнего прессования; *6* — шток; *7* — плита; *8* — нижняя траверса; *9* — малая нижняя траверса; *10*, *11* — пуансоны; *12* — гидроцилиндр перемещения питателя; *13* — питатель; *14* — верхняя траверса; *15* — керны; *16* — верхние пуансоны; *17* — траверса; *18*, *19* — регулируемые упоры; *20* — гидроцилиндр; *21* — регулируемые клиновые упоры; *22* — тяга

сначала поднимаются тяга *22* и верхняя траверса *14*, в результате чего происходит вытягивание кернов *15* из изделий.

После соприкосновения бруса *1* и верхней скобы *2* начинают перемещаться колонны *4*, и верхняя траверса *17* с пуансонами *16* возвращается в исходное положение. В момент подъема траверсы *17* шток гидроцилиндра *5* опускается вниз до упора *21*, происходит отрыв нижних пуансонов от изделий, снимается давление на упор *19*. Затем с помощью гидроцилиндра *20* упор перемещается вправо, и его опорная поверхность поднимается выше. После этого шток *6* гидроцилиндра *5* вновь поднимается вверх и подхватывает нижнюю траверсу с пуансонами *11*, которые выталкивают изделия из зоны прессования, так как упор *19* переместился выше.

Траверса *8*, дойдя до нового положения упора *19*, останавливается, после чего поднимается вверх шток гидроцилиндра *20*, и внутренние пуансоны *10* извлекают изделие из формы. После снятия изделий пуансоны возвращаются в исходное положение. Уровень установки нижних пуансонов регулируется клиновым упором *21*, а верхнее положение при прессовании — упором *19*.

Особую сложность представляет формование инструментов малых размеров с различной высотой сечения в направлении прессования. На рис. 3.31 в качестве примера показана последовательность формования головок формы

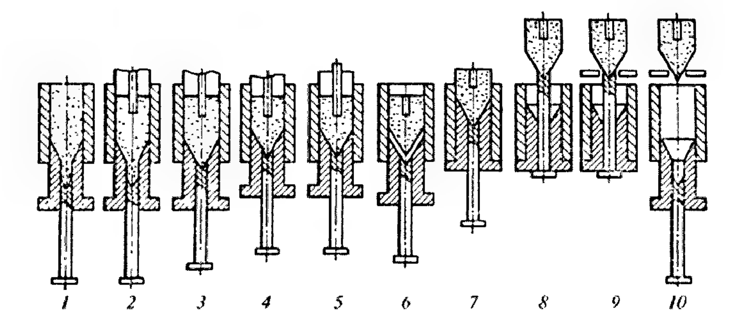


Рис. 3.31. Схема формования головок

ГК. Для того чтобы обеспечить равномерную плотность заготовки, применяют двухстороннее прессование. Первоначально головка прессуется верхним пуансоном (см. рис. 3.31, позиции *1*, *2*), а затем подпрессовывается нижним (позиции *3*, *4*). После выталкивания из пресс-формы (см. рис. 3.31, позиции *5*—*10*) головка переносится на плиту для сушки.

Изготовление сегментов и плит для брусков. Для производства мелко- и тонкозернистых абразивных плит для брусков размером 170 × 116 мм и высотой от 6 до 30 мм и сегментов из шлифовальных материалов 25А и 63С применяются формовочные агрегаты усилием 1,6 МН моделей ФАО-160П и ФАО-160С.

На формовочном агрегате выполняются следующие операции: подача формовочной смеси из питателя в дозатор; подача формовочной смеси из дозатора в пресс-форму; предварительное уплотнение смеси в пресс-форме; прессование; выталкивание заформованной плиты; сталкивание плиты из зоны формования. Все операции, за исключением загрузки формовочной смеси в бункер питателя и съема готового изделия, осуществляются автоматически по непрерывному циклу. Схема формовочного агрегата изображена на рис. 3.32, а характеристика формовочных агрегатов моделей ФАО-160П и ФАО-160С приведена в табл. 3.19.

Дозирование и укладка абразивных смесей на керамической связке в пресс-формы производится при помощи сжатого воздуха. Механизированная установка (рис. 3.33) состоит из пресса усилием 3,15 МН, пескострельной машины *2* модели 28Б5 с набором приставок *5*, скипового подъемника *4* с приемным бункером *3*, тележки с пресс-формой *7*, передвигающейся по рельсовому пути *6*. Приставка (рис. 3.34), предназначенная для равномерной укладки смеси в пресс-форму, состоит из корпуса *1*, регулировочной гайки *2*, позволяющей изменять объем формы при укладке смесей различных характеристик, из вентиляционной плиты *3*, корпуса *4* с кольцевыми дюзами *5*, обеспечивающими укладку смеси по кольцу формы.

Все узлы, за исключением скипового подъемника, связаны в один агрегат, управляемый с общего пульта при двух режимах: наладочном и автоматическом.

При испытании машин контролировалась точность получения навесок смесей и равномерность распределения смеси в пресс-форме по определению

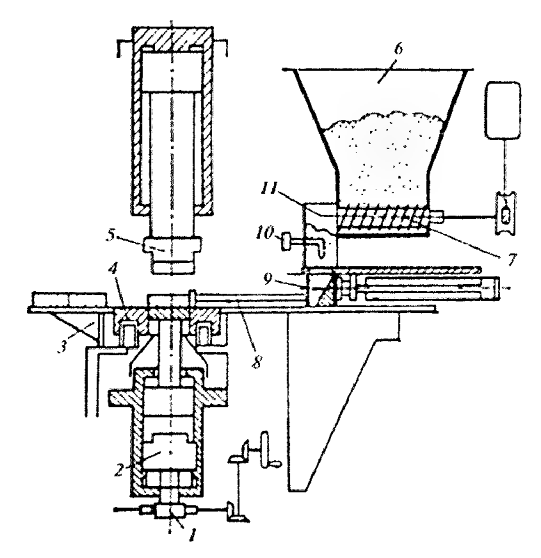


Рис. 3.32. Формовочный агрегат модели ФАО-160:

1 — червячная пара; *2* — гайка; *3* — приемный столик; *4* — пресс-форма; *5* — верхний пуансон; *6* — двухшнековый питатель; *7* — шнек; *8* — упор; *9* — кассета дозатора; *10* —датчик сигнализатора уровня ЭСУ-4; *11* — промежуточный рукав

Таблица 3.19

Характеристика формовочных агрегатов модели ФАО

Техническая характеристика	Модель пресса	
	ФАО-160 П	ФАО-160 С
Номинальное усилие, МН	1,6	1,6
Наибольшее перемещение штока главного цилиндра, мм	160	250
Наибольшее перемещение выталкивателя, мм	80	100
Скорость перемещения выталкивателя, мм/с	60	60
Перемещение кассеты, мм		
Число прессформ, шт.	1	2
Производительность, шт./ч	100	250
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	2130 × 990 × 4000	2130 × 990 × 4174
Масса агрегата, кг	4174	4174

Примечание. Рабочее давление в главном цилиндре $200 \cdot 10^5$ Па.

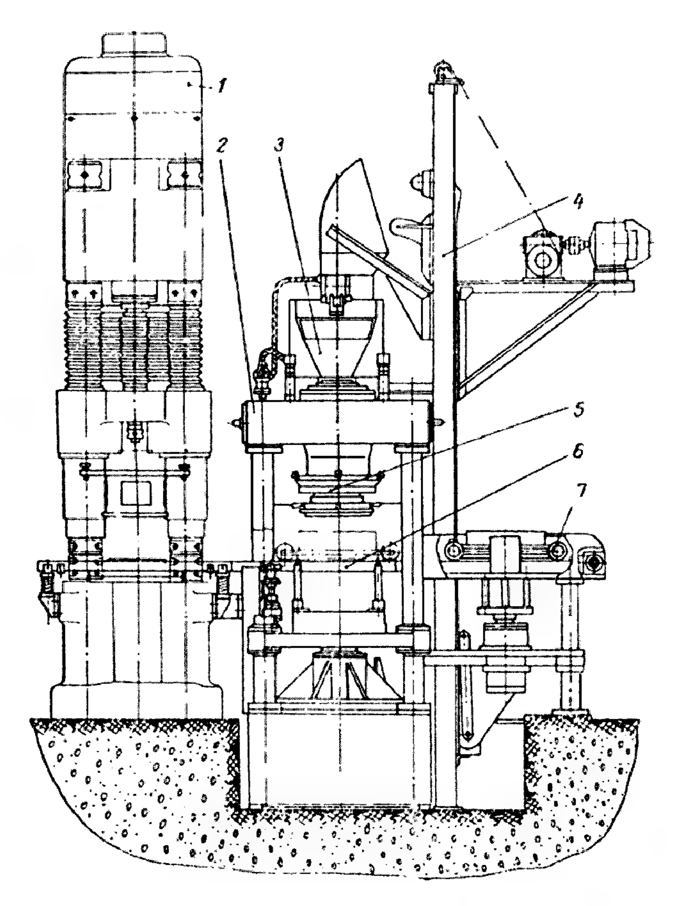


Рис. 3.33. Общий вид механизации пресса усилием 3,15 ММ с пескострельной машиной модели 28Б5:

1 — пресс усилием 3,15 МН; *2* — пескострельная машина модели 28Б5; *3* — приемный бункер; *4* — скиповый подъемник; *5* — набор приставок; *6* — рельсовый путь; *7* — тележка с пресс-формой

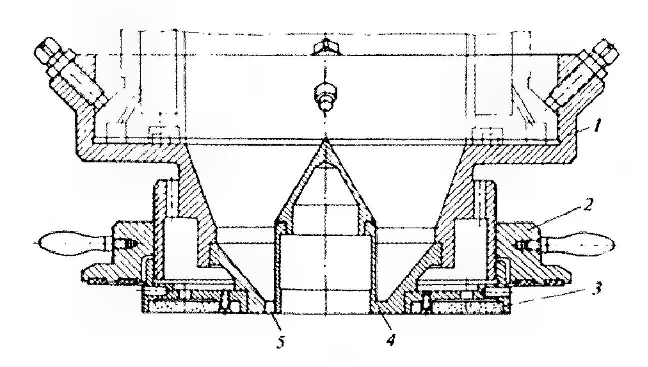


Рис. 3.34. Приставка пескострельной машины модели 28Б5:
1 — корпус; *2* — регулировочная гайка; *3* — вентиляционная плита; *4* — корпус; *5* — кольцевые дюзы

твердости, дисбаланса и сравнению стойкости кругов на операциях шлифования со стойкостью кругов, изготовленных при обычных способах укладки смесей в форме.

Все испытанные пескострельные машины, независимо от размера изготовляемых изделий, позволяют получать навески смесей с точностью до ±1,0 % от расчетной, а твердостью — в пределах одной степени [180, 181].

Агрегаты усилием 3,15 и 6,30 МН с объемным дозированием и пневматической укладкой. Агрегаты формовочные однопозиционные усилием 3,15 и 6,30 МН предназначены для формования шлифовальных кругов диаметром 200—500 мм на керамической связке с применением объемного дозирования и пневматической укладкой формовочной смеси в пресс-форму (рис. 3.35).

Формовочная смесь подается в приемный бункер *9*, из которого с помощью вибропротирочного устройства *10* поступает на лоток *12*. При открытом клапане шибера *11* смесь по лотку *12* поступает в рабочую камеру *13*. Внутри рабочей камеры размещаются лопасти ворошителя *14*, получающие вращение от привода *8*. В рабочей камере установки расположен уровнемер *7*, с помощью которого поддерживается постоянный уровень формовочной смеси. При недостаточном объеме смеси в рабочей камере уровнемер подает команду на вибропротирочное устройство, последнее включается, и смесь через лоток поступает в рабочую камеру, заполняя недостающий объем. Затем по команде от уровнемера вибропротирочное устройство выключается, и подача смеси прекращается. Подача сжатого воздуха во время задува смеси в пресс-форму производится при закрытом клапане шибера от заводской сети через ресивер и далее через клапан *6*, расположенный в корпусе рабочей камеры. К нижней части рабочей камеры крепится приставка *15* с пуансоном, через отверстие в котором смесь при подаче сжатого воздуха в рабочую камеру поступает в пресс-форму.

Рабочая камера расположена в верхней неподвижной траверсе гидравлического пресса рамной конструкции. На подвижной траверсе *1* смонтирован

прессующий узел. Он состоит из пресс-формы *5*, установленной на четырех направляющих колоннах *17* с пружинами *16*, обеспечивающими подпрессовку нижней формовочной плиты *4*, связанной со штоком выталкивания *2*, и оправки *3*. Перемещение нижней траверсы осуществляется гидравлическим цилиндром *19* поршневого типа. Съем готовых изделий на сушильную плиту, установленную на приемный столик *18*, осуществляется с помощью съемника. Агрегаты работают в наладочном и автоматическом режимах.

При помощи кнопки "Пуск" подвижная траверса с пресс-формой идет вверх до смыкания с приставкой рабочей камеры. Команду на остановку подвижной траверсы подает выключатель, с помощью которого производится регулирование объема пресс-формы. Одновременно подается команда на закрытие клапана шибера, включение привода ворошителя и открытие выпускного клапана. Время задува регулируется реле времени. Формовочная смесь вместе с воздухом подается в пресс-форму, заполняя установочный объем, воздух из пресс-формы уходит наружу через фильтрующий элемент, расположенный на периферии приставки. По истечении установленного времени реле времени подает команду на движение подвижной траверсы вверх, закрытие клапана задува и открытие клапана шибера, и происходит прессование изделия. Команду на окончание прессования (допрессовку) подает выключатель, контролирующий высоту изделия, или ЭКМ, контролирующий давление. После окончания прессования подвижная траверса опускается вниз. Подается команда, и съемник устанавливается над пресс-формой. Гидроцилиндр производит выталкивание изделия из пресс-формы, а съемник укладывает изделие на сушильную плиту, установленную на приемный столик.

В табл. 3.20 приведены технические характеристики формовочных агрегатов с объемным дозированием и пневматической укладкой.

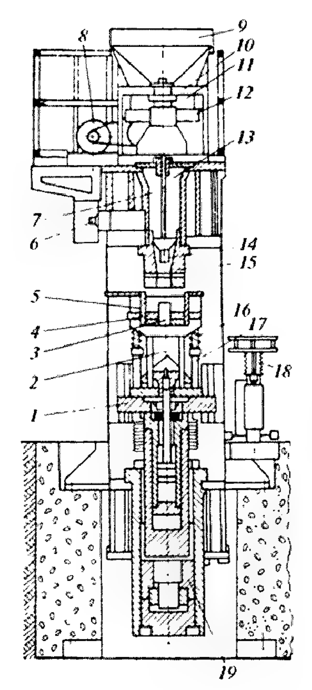


Рис. 3.35. Формовочный однопозиционный агрегат с объемным дозированием и пневматической укладкой:

1 — подвижная траверса; *2* — выталкиватель; *3* — оправка; *4* — нижняя формовочная плита; *5* — пресс-форма; *6* — клапан; *7* — уровнемер; *8* — привод ворошителя; *9* — приемочный бункер; *10* — вибропротирочное устройство; *11* — шибер; *12* — лоток; *13* — рабочая камера; *14* — лопасти ворошителя; *15* — приставка; *16* — пружины; *17* — направляющие колонны; *18* — приемный столик; *19* — гидроцилиндр

Автоматические формовочные агрегаты моделей АФА-1А и АФА-7 усилием 3,15 и 6,30 МН с весовым дозированием, механизированной укладкой и разравниванием формовочной смеси. Агрегаты предназначены для производства абразивных изделий на керамической и пульвербакелитовой связках формы 1 диаметром 250—350 мм, высотой 6—50 мм (АФА-1А) и диаметром 400—600 мм, высотой 25—75 мм (АФА-7). Автоматические

Таблица 3.20

Характеристика формовочных агрегатов с объемным дозированием и пневматической укладкой

Техническая характеристика	Модель агрегата	
	ДО-635	ДО-638
Номинальное усилие, МН:		
пресса	3,15	6,30
выталкивателя	0,20	0,20
Перемещение, мм:		
подвижной траверсы	320	320
выталкивателя	190	210
Производительность, шт./ч	120	90
Открытая высота, мм	1325	1480
Расстояние между стенками в свету, мм	1100	1100
Размеры формуемых кругов, мм		
Наружный диаметр	200–350	400–500
Высота	16–50	20–63
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	3240 × 2190 × 3740	3240 × 2190 × 4060
Масса агрегата, кг	22000	29000

агрегаты состоят из гидравлического трехколонного пресса усилием 3,15 и 6,30 МН, четырехпозиционного поворотного стола с четырьмя пресс-формами, механизма укладки и разравнивания формовочной смеси в пресс-форме, съемника кругов, привода стола. Цикл работы агрегатов — автоматическая навеска порции смеси, укладка смеси в пресс-форму, разравнивание, выталкивание заформованного круга, съем и перенос круга на сушильную плиту — полностью автоматизирован.

Характеристика агрегатов с весовым дозированием смеси представлена в табл. 3.21.

Таблица 3.21

Характеристика формовочных агрегатов с весовым дозированием

Техническая характеристика	Модель агрегата	
	АФА-1 А	АФА-7 А
Усилие гидравлического пресса, МН	3,15	6,30
Размеры формуемых кругов, мм:		
Наружный диаметр	250–350	400–600
Высота	6–50	25–75
Диаметр отверстия круга	75–127	127–305
Производительность агрегата, шт./ч на кругах размером:		
600 × 75 × 305 мм	–	55
300 × 40 × 76 мм	180	–
Расстояние между колоннами в свету, мм	750	1160
Усилие выталкивателя, МН	0,07	0,20
Мощность электродвигателя, кВт	25	41,1
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1750 × 2500 × 3500	3750 ×3470 × 4630
Масса агрегата, кг	12500	37000

Автоматические формовочные агрегаты моделей ДАО-635 и ДАО-638 с поворотными столами и задувными машинами предназначены для формования кругов прямого профиля только на керамической связке (рис. 3.36). В этих моделях формовочная смесь из бункера *4* подается в рабочую камеру задувной машины до заданного уровня, после чего шибер *3* закрывает загрузочное отверстие. Пресс-форма *8* с помощью гидроцилиндра прижима *9* поднимается вверх и прижимается к приставке *6*, которая внедряется на определенную глубину в пресс-форму, образуя между собой и нижней формовочной плитой в пресс-форме объем, соответствующий порции смеси, идущей на один круг. Этот объем может регулироваться.

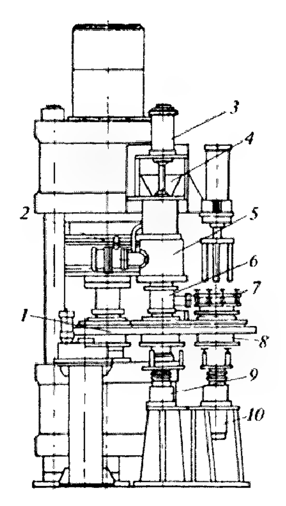


Рис. 3.36. Формовочный агрегат с поворотным столом и задувной машиной:
1 — поворотный стол; *2* — разгрузочный клапан; *3* — шибер; *4* — бункер; *5* — задувная машина; *6* — приставка; *7* — пневмосъемник; *8* — пресс-форма; *9* — гидроцилиндр прижима; *10* — выталкиватель

После прижима пресс-формы подается сигнал на открытие разгрузочного клапана *2*, и сжатый воздух из ресивера поступает в рабочую камеру *5* задувной машины, увлекая формовочную смесь в образовавшийся объем пресс-формы, а воздух уходит через керамическую плиту наружу. Время задува регулируется реле времени. По окончании задува разгрузочный клапан *2* закрывается, а через 2—3 с шибер *3*, открываясь, нажимает на конечный выключатель, который подает команду на опускание штока гидроцилиндра *9*. Шток, двигаясь вниз, опускает пресс-форму на стол пресса *1*. После этого подается команда на поворот стола и пресс-форма поступает на позицию прессования, после которого перемещается на позицию выталкивания, где цилиндр выталкивателя *10* штырями выталкивает буксирную плиту пресс-формы вместе с заформованным кругом. Пневмосъемник *7*, который в исходном положении находится над пресс-формой и выталкивателем, захватывает заформованный круг и переносит его на сушильную плиту, после чего возвращается в исходное положение, и на этом цикл заканчивается.

На данных формовочных агрегатах укладка смеси в пресс-форму, прессование и выталкивание круга на соответствующих позициях выполняются одновременно.

Характеристика автоматических формовочных агрегатов моделей ДАО-635 и ДАО-638 представлена в табл. 3.22.

Агрегаты формовочные усилием 12,5 МН (модель АФА-8) и 20 МН (модель АФА-9). Эти формовочные агрегаты предназначены для формования крупнозернистых шлифовальных кругов на керамической связке диаметром от 600 до 1400 мм, высотой до 200 мм с отверстиями 203 и 305 мм. Основой агрегатов является гидравлический рамный пресс с нижним давлением (рис. 3.37). Агрегат состоит из одного пресса и двух комплектов технологических машин, расположенных по обе стороны пресса. Пресс-формы смонтированы на самоходных

Таблица 3.22

Характеристика формовочных агрегатов с новоротными столами и задувными машинами

Техническая характеристика	Модель агрегата	
	ДАО-635	ДАО-638
Номинальное усилие, МН	3,15	6,30
Размеры формуемых кругов, мм		
Наружный диаметр	175–300	400–600
Высота	6–63	10–63
Диаметр отверстия круга	32–203	76–305
Производительность, шт./ч	225	120
Мощность электродвигателя, кВт	30	40

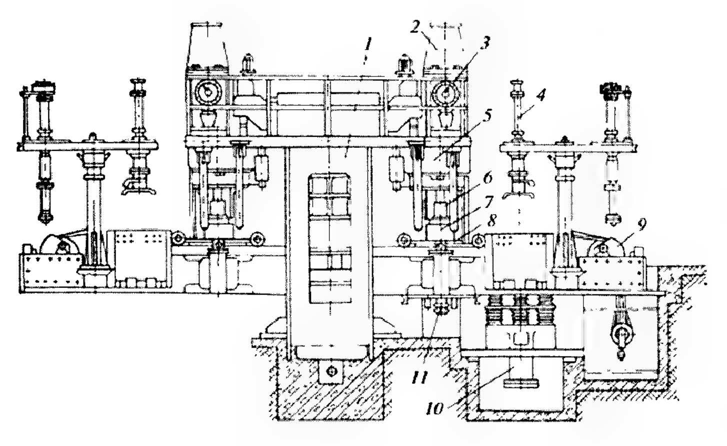


Рис. 3.37. Автоматический формовочный агрегат АФА-9:

1 — гидравлический пресс; *2* — расходный бункер; *3* — автоматические весы; *4* — съемник кругов; *5* — разравнивающая машина; *6* — спираль; *7* — пресс-форма; *8* — тележка; *9* — подвижный блок; *10* — выталкиватель; *11* — подъемник

тележках и оснащены устройствами для подпрессовки изделий. На таком агрегате одновременно могут формоваться круги различных высот, но одинаковых диаметров и зернистости. Режим работы автоматический пооперационный и наладочный. Формование может производиться также и на одном комплекте машин, в то время как второй комплект машин может переналаживаться под другой типоразмер.

Расходный бункер *2*, в который смесь загружается специальной емкостью, снабжен уровнемером, при помощи которого посылается команда на очередную загрузку бункера. Автоматическими весами *3* заданная навеска направляется в бункер разравнивающей машины *4*. Питатель разравнивающей машины

и спираль *5* имеют вращательное движение; вертикальное перемещение тележки *7* с пресс-формой *6* осуществляется шарикоподшипником *11*, назначение которого — обеспечить осевое перемещение пресс-формы в процессе разравнивания. Гидроподъемник работает в следующем режиме: быстрый подъем вверх до положения, когда зазор между спиралью и нижней плитой не превышает 3–5 мм, затем в этом положении происходит вращение разравнивающей машины и опускание тележки с пресс-формой, при этом происходят укладка и разравнивание смеси в пресс-форме.

Перед выходом смеси из-под воздействия спиралей скорость гидроподъемника снижается, что позволяет заравнивать верхний слой смеси. Затем тележка опускается на рельсовый путь и начинается ее перемещение на позицию прессования.

Пресс-форма смонтирована на тележке *7*, которая снабжена гидравлическим приводом, состоящим из гидромотора с регулируемой частотой вращения и конического редуктора. Разгон и торможение тележки обеспечиваются специальными конечными выключателями. Питание гидродвигателей маслом осуществляется специальными гибкими шлангами через подвижный блок *9*.

На заданной позиции тележка фиксируется специальными фиксаторами. Прессование кругов производится гидравлическим прессом *1* и может осуществляться в режиме до заданной высоты от конечного выключателя или до заданного давления от электроконтактного манометра. Для кругов высотой более 50 мм предусмотрена подпрессовка с помощью автоматических подкладок. После прессования тележка с пресс-формой поступает на позицию выталкивания, выталкиватель *10* обеспечивает усилие выталкивания до 0,5 МН. Агрегат оборудован специальным механизмом *8* для съема круга с плитой и укладки в пресс-форму новой плиты.

Таблица 3.23

Характеристика агрегатов моделей АФА-8 и АФА-9

Техническая характеристика	Модель	
	АФА-8	АФА-9
Номинальное усилие, МН	12,5	20,0
Размеры формуемых кругов, мм		
Наружный диаметр	600–900	900–1400
Высота	200	200
Расстояние между стойками пресса в свету, мм	1300	1780
Пределы взвешивания порции шихты, кг	10–50	25–120
Производительность, шт./ч	20–25	16–20
Мощность электродвигателя, кВт	97	113
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	1250 × 7580 × 4600	1810 × 6400 × 4650
Масса агрегата, т	100	125

Примечание. Давление жидкости в системе $200 \cdot 10^5$ Па.

Характеристика формовочных агрегатов моделей АФА-8 и АФА-9 приведена в табл. 3.23.

3.3.4. Основные конструктивные особенности пресс-форм для абразивного инструмента

Разнообразие форм и размеров абразивных инструментов требует и большого разнообразия конструкций пресс-форм. Технически обоснованный выбор конструктивных параметров деталей пресс-форм существенно влияет на качественные показатели изделий после их прессования [182].

В абразивном производстве, как правило, используют пресс-формы, состоящие из наружной обоймы (кольца) и оправки (керна), образующей отверстие в круге; двух формовочных плит (верхней и нижней) (см. рис. 3.16).

Пресс-формы могут быть классифицированы по следующим основным признакам: по принципу прессования — без подпрессовки и с подпрессовкой; по количеству гнезд — одно- и многогнездные; по технологическому принципу — прессование без гидроплиты и с гидроплитой по конструкции прессуемого изделия (конфигурации).

В зависимости от условий эксплуатации пресс-формы могут быть стационарными или съемными и используются при прессовании ими "до упора" или до заданного давления.

Стационарные пресс-формы применяют обычно при крупносерийном производстве изделий, они являются неотъемлемой частью конструкции специализированного пресса. В отличие от стационарной съемную пресс-форму можно снять и заменить другой для формования следующего типоразмера изделия.

Малые пресс-формы можно легко перемещать вручную, а пресс-формы для кругов средних и больших размеров, весящих десятки и сотни килограммов, перемещают с помощью специальных тележек.

Плиты пресс-форм в ряде случаев требуется снимать, что делается вручную или с помощью специальных приспособлений.

Проектирование пресс-форм следует начинать с выбора конструкции.

На выбор конструкции пресс-формы влияют следующие факторы: конфигурация и размеры изделия; количество формуемых изделий; оборудование для формования изделий; технологические требования к заформованному изделию; материалы для изготовления деталей пресс-форм, принятые на данном заводе. После выбора конструкции производят расчет пресс-формы, который включает определение технологических размеров корпуса пресс-формы, оправок и дополнительных плит, проверку на прочность деталей, воспринимающих нагрузку. Размер внутреннего диаметра кольца пресс-формы определяется с учетом припуска на механическую обработку круга по периферии после термообработки. Как правило, припуск для кругов диаметром 200—600 мм составляет 3—4 мм, для кругов диаметром 600—1100 мм и выше — 6—10 мм, а диаметром менее 200 мм — 1,0—1,5 мм. В случае если круги диаметром менее 200 мм выпускаются без механической обработки, то внутренний диаметр колец пресс-форм выбирается равным номиналу.

Расчет высоты кольца пресс-формы должен выполняться с учетом насыпного объема абразивной формовочной смеси, которая до прессования в 1,5—3 раза больше объема заформованной заготовки, т. е. высота кольца пресс-формы рассчитывается по формуле

$$H = h_1 + H_{нас} + 15,$$

где h_1 — высота нижней формовочной плиты, мм; $H_{нас}$ — высота формовочной смеси после засыпки в пресс-форму, мм.

При этом $H_{нас} = K_c T_{изд}$; здесь $T_{изд}$ — высота запрессованного изделия, K_c — коэффициент спрессовывания (для крупнозернистых смесей K_c = 1,6–1,8, для мелкозернистых K_c = 2,5–2,8).

Высота в 15 мм принимается для удобства разравнивания формовочной смеси и для удобства введения верхней формовочной плиты, а также в случае колебания K_c.

Толщина стенки кольца пресс-формы должна быть в пределах 20–50 мм в зависимости от наружного диаметра формуемых изделий и с учетом удельного давления прессования. Для кругов диаметром до 600 мм при удельном давлении прессования до 3,5 МН толщина стенки кольца принимается равной 20–40 мм, для кругов диаметром свыше 600 мм при удельном давлении прессования 3,5–5,0 МН — 40–50 мм.

Для обеспечения возможности крепления пресс-формы при любом способе подпрессовки необходимо предусматривать по наружному диаметру кольца кольцевую выточку глубиной 5–10 мм со скосом по верхней части, а при выталкивании из пресс-формы заформованной заготовки круга внутренняя часть кольца должна быть выполнена с конусностью из расчета 0,4 на 100,0 мм высоты кольца.

Оправка пресс-формы по высоте должна быть на 1–2 мм меньше высоты кольца. Если абразивный круг не обрабатывается по посадочному отверстию, то наибольший номинальный диаметр оправки принимается с учетом ее износа и усадки изделия после термообработки равным максимально допустимому диаметру посадочного отверстия круга по ГОСТ 2424–83, а конусность оправки выбирается с учетом обеспечения диаметра отверстия в круге в пределах допуска по ГОСТ 2424–83.

Верхнюю и нижнюю формовочные плиты следует брать одинаковыми, причем наружный номинальный диаметр плит берется равным меньшему номинальному размеру внутреннего диаметра кольца, а номинальный диаметр отверстия плит — большему номинальному диаметру оправки. Толщина плит выбирается в пределах 20–40 мм, причем для заготовок кругов диаметром до 600 мм толщина плит выбирается равной 20–30 мм, а для заготовок кругов диаметром свыше 600 мм — 30–40 мм.

В целях увеличения срока службы пресс-форм и облегчения выталкивания заготовок кругов у формовочных плит необходимо предусматривать кольцевые канавки по наружному диаметру и по отверстию. В наружных канавках необходимо предусматривать четыре радиально расположенных отверстия для плиты при помощи вставляемых в отверстия штырей. Сопряжение формовочных плит с кольцом пресс-формы и оправкой рекомендуется выбирать по ходовой посадке третьего класса точности.

Материалы для изготовления пресс-форм должны обладать высокими прочностью, твердостью, износостойкостью и теплостойкостью (при горячем прессовании).

При изготовлении пресс-форм для холодного прессования заготовок могут быть использованы: стали 45, 50, 50Г с закалкой после индукционного

нагрева до твердости HRC 58–62; сталь 20Х с закалкой после цементации (HRC 56–62); сталь 40Х с закалкой (HRC-45–50); сталь У8А, У10А, ХВГ с закалкой (HRC 58–62); твердый сплав ВК8.

Кольца пресс-форм могут изготовляться также из конструкционной качественной стали без закалки, но для повышения износостойкости внутрь кольца, в специальную выточку необходимо встраивать сменную вставку из термообработанной пружинной ленты из стали марки 65Г [183].

Наибольшему износу подвержены оправки, формующие посадочные отверстия абразивных кругов. Оправки для крупногабаритных кругов с диаметрами отверстий 76, 127, 203 и 305 мм изготавливаются, как правило, из сталей марок У9, У10 и У12.

Оправки для малогабаритных кругов, изготовляемых на прессах типа ФПР, с диаметром отверстий 20, 32 и 50 мм изготавливаются из сталей марок 40Х, Х12Ф1, У10 и др. с разными режимами термической и химико-термической обработки, обеспечивающих износостойкость оправок (количество заформованных кругов) от 1450 (оправки из стали У10, используемой на заводах) до 2950 (сталь У10, подвергнутая борированию при 970 °С в течение 6 ч с глубиной слоя 120 мкм с последующей закалкой с 810 °С в воду и отпуском).

Наибольшую износостойкость (до 4800) показали оправки, подвергнутые диффузионному ванадированию (1200 °С в течение 6 ч, с нормализацией при 850 °С в течение 1 ч, закалкой с 810 °С в масле, с отпуском). Исследования изношенной поверхности показали отсутствие следов царапанья и микрорезания в виде продольных рисок [183].

Пресс-формы для горячего прессования изготавливаются из сталей марок 9ХС с закалкой (HRC 58–62), Х12И с закалкой (HRC 57–59), 5ХНМ с закалкой (HRC 35–41).

Чистота обработки рабочих поверхностей пресс-форм должна соответствовать R_a 1,25·0,63. Такая обработка обеспечивает повышенный срок службы деталей, облегчает процесс выталкивания заготовки изделия из пресс-формы и повышает качество формуемых абразивных кругов.

Расчет деталей пресс-форм на прочность. В процессе прессования абразивных изделий возникает боковое давление абразивной формовочной смеси меньше, чем давление прессования. Отношение бокового давления $P_{бок}$ к давлению прессования P называется коэффициентом бокового давления: $\alpha = P_{бок}/P$. При расчете деталей пресс-форм можно принять $\alpha = 0,5$, тогда $P_{бок} = 0,5P$. Давление P задается технологией и определяется путем пробного прессования. Зная величину P, определяют боковое давление $P_{бок}$ и рассчитывают толщину стенки пресс-форм.

Кольца пресс-форм для формования абразивных кругов рассчитываются как толстостенные цилиндры. Цилиндр считается толстостенным, если толщина его стенки составляет больше 0,1 его среднего радиуса.

В стенках кольца пресс-формы, находящегося под действием $P_{бок}$, возникает сложное напряженное состояние. Напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях определяются по формулам Ламе. Суммируя найденные напряжения по теории напряженных состояний, получают формулу для расчета стальных цилиндров:

$$D_{н} = D_{в}\sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma]-2P_{бок}}},\ мм,$$

где $D_{н}$ и $D_{в}$ — соответственно наружный и внутренний диаметры кольца пресс-формы, мм; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, Н, которое определяется по временному сопротивлению материала, из которого изготовляются детали пресс-форм, т. е. $[\sigma] = \sigma_{в}/K_{з}$ ($\sigma_{в}$ — временное сопротивление или предел прочности, Н, $K_{з}$ — коэффициент запаса прочности).

Так как детали пресс-форм испытывают при прессовании переменную (пульсирующую) нагрузку, то коэффициент запаса прочности $K_{з}$ (с учетом неоднородности материала, неточности заданных внешних нагрузок, приближенности расчетных схем, конструкции напряжений абсолютных размеров для переменной нагрузки при пластичном состоянии) принимается равным $K_{з} = 5–15$.

Для расчета деталей пресс-форм с учетом условий их эксплуатации принимают $K_{з} = 6$.

В случае если диаметры кольца пресс-формы заданы, проверку прочности производят по формуле

$$\sigma = \frac{2P_{бок}}{1-k^{2}} \leq [\sigma_{в}],$$

где $k = D_{в}/D_{н}$ ($D_{н}$, $D_{в}$ — соответственно наружный и внутренний диаметры) кольца пресс-формы.

3.3.5. Механизмы для выталкивания и съема изделий

Выталкиватели. Спрессованные абразивные изделия (круг, сегмент, брусок) извлекаются из пресс-форм с помощью выталкивателей.

Усилие выталкивания определяется по формуле

$$P_{в} = k\pi(D + H)Tp,$$

где D — наружный диаметр круга, см; H — внутренний диаметр отверстия круга, см; T — высота круга, см; p — давление прессования, кг/см²; k — коэффициент, равный 0,04–0,05.

По экспериментальным данным усилие выталкивания составляет 3–4 % от номинального усилия пресса.

При малых усилиях могут применяться ручные либо ножные механические выталкиватели, но, как правило, применяют гидравлические. Чаще всего запрессованное изделие выталкивается вверх и устройство для выталкивания (рис. 3.38) располагается под пресс-формой.

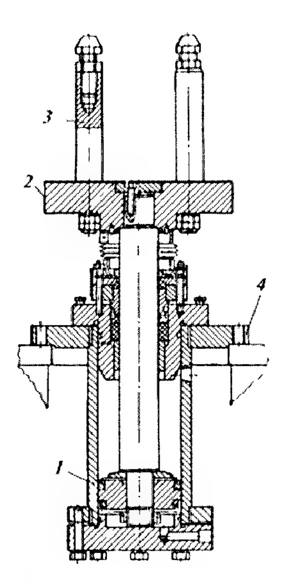


Рис. 3.38. Выталкиватель гидравлический:
1 — гидроцилиндр; *2* — плита; *3* — штырь; *4* — плита крепления выталкивателя

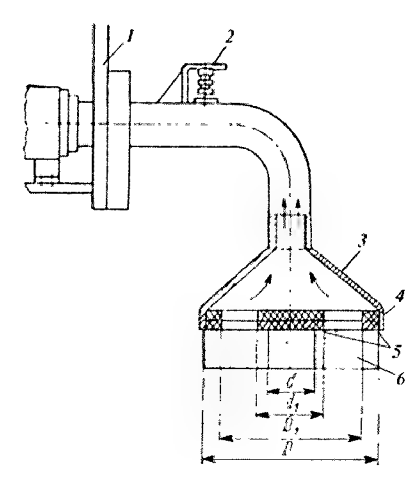


Рис. 3.39. Вакуум-съемник:
1 — вентилятор высокого давления; *2* — воздушный клапан с электромагнитом; *3* — колокол; *4* — нижняя решетчатая плита; *5* — резиновое уплотняющее кольцо; *6* — выталкиваемый абразивный круг

Вакуум-съемники. Вакуум-съемники применяются для съема шлифовальных кругов с формовочной плиты диаметром 125–500 мм и высотой до 40 мм (рис. 3.39).

Выталкиваемый абразивный круг *6* (наружный диаметр — *D*, внутренний — *P*) прижимается к нижней решетчатой плите *4* колокола *3*. Резиновые уплотняющие кольца *5* обеспечивают необходимое уплотнение и предохраняют круг от повреждения. Вакуум над верхней поверхностью круга создается вентилятором высокого давления *1*. После переноса взятого круга на позицию укладки освобождение его производится с помощью воздушного клапана *2* с электромагнитом, который по сигналу отключает вентилятор высокого давления, снимая вакуум, и круг спокойно опускается на подкладную плиту для дальнейшей его транспортировки на участок сушки.

При создании нужного усилия, необходимого для удерживания круга под колоколом, должно быть соблюдено неравенство

$$\pi/4(D_1^2 - d_1^2)p > G,$$

где D_1 — внутренний диаметр внешнего уплотнительного кольца, см, $D_1 = D - 2$; d_1 — наружный диаметр уплотнительного диска, см, $d_1 = 2 - d$; p — вакуум, Па; G — масса круга, кг.

Для обеспечения устойчивого закрепления круга под колоколом необходимо, чтобы давление прижима круга к колоколу в два раза превышало массу круга, т. е.

$$P = 98066,5\frac{2G}{S_1 - S_2},$$

откуда

$$S_1 = \pi D_1^2/4; \quad S_2 = \pi d_1^2/4; \quad (S_1 - S_2)p = 98066,5. \qquad (3.3)$$

Как видно из равенства (3.3), необходимое разрежение прямо пропорционально массе круга и обратно пропорционально площади круга, находящейся под воздействием вакуума. С увеличением высоты круга, а следовательно, и его массы снижается воздушная проницаемость, которая зависит от его пористости. Меньшей пористостью обладают круги на бакелитовой связке и мелкозернистые круги.

Пневмосъемники. Пневмосъемники (рис. 3.40) применяются для съема шлифовальных кругов диаметром 125–600 мм и высотой свыше 40 мм.

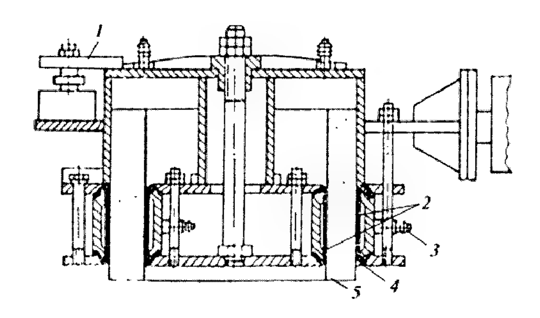


Рис. 3.40. Пневмосъемник:
1 — тензодатчик; *2*, *4* — резиновые камеры;
3 — ниппели; *5* — снимаемый круг

Снимаемый абразивный круг *5* размещается между стенками двух резиновых камер *2*, которые захватывают изделия за внутреннюю и внешнюю поверхности. Воздух по шлангам через ниппели *3* подается в полость резиновых камер *4*. Абразивный круг зажимается между резиновыми стенками и с помощью пневмоцилиндра, перемещающего пневмосъемник, переносится с позиции выталкивания на позицию укладки, где подача воздуха в резиновые камеры прекращается, и шлифовальный круг устанавливается на сушильную плиту. Затем пневмосъемник возвращается в исходное положение. На пневмосъемнике установлен тензодатчик *1*, который одновременно производит взвешивание изделия для контроля массы круга. Кроме описанной конструкции применяются пневмосъемники, в которых зажим круга производится с помощью только одной резиновой камеры, расположенной на внешней стороне круга.

Съемник крупногабаритных шлифовальных кругов. Формование крупногабаритных шлифовальных кругов диаметром 750—1400 мм всех высот производится с применением подкладных плит. Для съема этих кругов с подкладными плитами применяются специальные съемники, выполненные в виде разжимных захватов, которые в сжатом состоянии вставляются в отверстие круга с подкладной плитой. Затем под действием пружины захваты разжимаются и своими зацепами захватывают нижний край подкладной плиты.

Транспортировка круга осуществляется с помощью подъемных механизмов. В целях сокращения времени на съем абразивного круга и установку свободной подкладной плиты в пресс-форму агрегаты, предназначенные для формования крупногабаритных шлифовальных кругов, оборудуются двухконсольной поворотной балкой, на концах которой закрепляются подъемные механизмы со съемниками кругов.

Одним съемником снимается круг с подкладной плитой, другим — поднимается свободная подкладная плита. При повороте балки шлифовальный круг с подкладной плитой укладывается на этажерку, а свободная подкладная плита опускается в пресс-форму.

3.3.6. Техника безопасности и производственная санитария

Работы на участке формования связаны с применением относительно сложных машин (гидравлические прессы, машины для разравнивания и прочие приспособления), требующих умелого и правильного управления ими. Обслуживание машин, а также выполнение различных операций при формовании требуют хорошего освещения рабочих мест, соответствующего отопления и вентиляции помещения, где производится формование.

При накладывании формовочной плиты следует проявлять осторожность или пользоваться соответствующими приспособлениями (держателями, штырями) во избежание ранения пальцев руки. При работе на прессах во время хода плунжера не рекомендуется поправлять, в особенности руками, формовочные и прижимные плиты, а также извлекать подкладки (при подпрессовке) из-под кольца и оправки пресс-формы, так как это может вызвать ранение рук.

При прессовании опасным моментом является развитие высоких давлений, которые могут вызвать повреждение оборудования и нанести травму работающим на прессе. Поэтому во время прессования работник, управляющий прессом, должен постоянно следить за показаниями манометра и не допускать превышения давления выше заданного.

При формовании изделий больших размеров следует избегать поднятия тяжестей в виде больших плит и кругов с плитами, не допуская превышения норм на одного человека: для женщин — не более 20 кг, для мужчин — не более 50 кг.

Таким образом, на всех производственных участках обязательно должно выполняться следующее положение: нельзя работать на неисправном и на непроверенном оборудовании, а также допускать к работе лиц без соответствующего инструктажа.

3.4. Термическая обработка абразивных изделий

Взаимодействие абразивных зерен с керамической связкой в абразивных изделиях происходит благодаря термической обработке последних.

Процесс термической обработки заформованных изделий осуществляется чаще всего в два приема: низкотемпературная обработка (сушка) и высокотемпературная обработка (обжиг и охлаждение).

Процессы сушки и обжига могут быть объединены в одну технологическую операцию. Однако на большинстве заводов эти операции разъединены, так как объединение требует сложной реконструкции печного оборудования [184].

3.4.1. Сушка абразивных изделий

Задача сушки изделий состоит в удалении влаги из заформованных заготовок в целях придания им возможно более высокой механической прочности.

Свежезаформованные заготовки изделий, поступающих на сушку, содержат сравнительно немного влаги (2,5–4,0 %), но обладают весьма низкой механической прочностью. Во время сушки удаляется несвязанная вода, "затвер-

девает" клеящий увлажнитель, и изделие приобретает прочность, достаточную для его укладки в стопки на вагонетки, на которых производится обжиг изделий [185].

Хотя контроль сушки осуществляется в производственных условиях по количеству остаточной влаги, режимы сушки (продолжительность и температура) задаются технологией в расчете на максимально возможную прочность высушенного изделия.

После сушки содержание влаги в заготовке уменьшается до 0,4–0,6 %. При этой влажности заготовка инструмента легко повреждается от удара, режется ножом, но ее прочность достаточна для транспортирования заформованного изделия в печь обжига.

В табл. 3.24 приведена механическая прочность свежезаформованных и высушенных изделий с использованием наиболее часто применяемых увлажнителей.

Таблица 3.24

Прочность сырых и высушенных заготовок абразивных кругов

Вид используемого увлажнителя шихты	Прочность сырца (заготовка) до ее сушки, МПа	Прочность высушенной заготовки, МПа
Растворимое стекло	0,030–0,068	0,8–2,0
Раствор декстрина	0,025–0,043	0,4–1,2

При остаточной влажности менее 0,4 % прочность опять снижается и наблюдается осыпаемость кромок заготовок инструмента, что объясняется, с одной стороны, поглощением изделиями влаги из окружающей среды, а с другой — потерей клеящими веществами их клеящей способности (декстрин). Поглощение изделиями влаги зависит от относительной влажности воздуха (табл. 3.25) [185].

Таблица 3.25

Механическая прочность и осыпаемость заготовок в зависимости от относительной влажности воздуха

Состояние образца	Механическая прочность при изгибе, МПа / осыпаемость образцов различных характеристик, %				
	34А 40 СМ2К6	24А 25 СМ2К6	24А 50 СТ1К6	24А 40 СТ2К6	24А 16 СТ2К9
После сушки	1,58/2,7	1,22/2,4	1,68/1,8	1,82/1,5	1,24/1,9
После сушки и 24 ч выдержки при влажности воздуха ψ, %					
20	1,59/2,6	1,33/2,2	1,70/2,0	1,46/1,9	0,97/2,1
40	1,33/3,2	1,22/2,5	1,94/2,2	1,11/2,6	0,88/1,85
60	0,83/4,5	0,84/3,7	1,58/4,6	0,85/3,9	0,85/3,1
80	0,48/5,2	0,73/4,8	1,09/5,4	0,63/4,5	0,61/4,4
100	0,36/7,6	0,53/6,3	0,81/8,1	0,50/7,3	0,45/5,8

Примечание. В числителе приведен предел прочности при изгибе, а в знаменателе — осыпаемость.

Как следует из данных, приведенных в табл. 3.25, механическая прочность образцов, выдержанных в течение суток при влажности, равной 60–80 %, уменьшается в два-три раза. Это приводит, во-первых, к увеличению механических повреждений изделий при транспортировке и постановке заготовок в обжиг, а во-вторых, к появлению брака в виде концентрических трещин.

Количество испарившейся влаги из заготовок абразивных изделий можно определить по формуле

$$h = G_c \frac{W_h - W_n}{100}, \text{ кг/ч},$$

где G — производительность сушила; W_h — абсолютная влажность материала; W_n — относительная влажность материала.

При сушке вследствие разности концентраций водяных паров непосредственно на поверхности изделия и в окружающей среде наступает явление внешней диффузии, при котором влага в виде пара будет переходить с поверхности изделия в окружающую среду. Стремление к равновесию вызывает перемещение влаги из внутренних слоев изделия к внешним. Такое перемещение влаги под действием разности концентраций обусловливается внутренней диффузией. Эти процессы внешней и внутренней диффузии взаимосвязаны на всем протяжении сушки и прекращаются при выравнивании концентраций водяных паров. В процессе сушки с течением времени происходит изменение массы изделия вследствие удаления из него влаги. Зная начальную влажность изделия, его массу и размеры, можно вычислить скорость сушки за определенный отрезок времени. Эту скорость обычно выражают в килограммах испаренной влаги с одного квадратного метра в час (кг/(м^2·ч)).

Процесс сушки можно разделить на три периода: первый период — подогрев изделия и нарастание скорости сушки до максимальной, когда количество тепла, получаемое изделием, расходуется на испарение влаги; второй период — это период постоянной скорости сушки, когда количество выделяемой влаги с единицы поверхности одинаково; при этом периоде происходит усадка пластичных материалов; третий период — уменьшение скорости сушки, вызванное сокращением интенсивности испарения влаги и выравниванием температуры, а также влажности на поверхности изделия и в окружающей среде.

Методы сушки. Наиболее распространенным методом сушки является конвекционный метод — передача тепла высушенному изделию от горячего теплоносителя, омывающего изделия. Сушка абразивных изделий по этому методу производится в камерных или туннельных сушилах, где используется специально нагретый воздух или воздух, отбираемый из зоны охлаждения термических печей. Указанный метод, несмотря на широкое распространение, имеет ряд существенных недостатков, например высокий расход теплоты (необходимо затратить 20935 Дж на 1 кг испаренной влаги), крайне низкую степень использования теплоносителя (воздуха), значительное время, необходимое для сушки изделия и пр. Рациональным этот метод можно считать только при условии, если на производстве используется теплота отходящих газов из зоны охлаждения туннельных печей для обжига.

Наиболее экономичной является сушка при использовании радиационного метода передачи теплоты, т. е. лучеиспусканием (тепловыми лучами). В этом

случае для нагрева используются инфракрасные (тепловые) лучи, занимающие, как известно, часть спектра в пределах длины волны от 0,74 мкм до 1—2 мм.

Практическое значение для сушки имеют лучи с длиной волны от 0,76 до 15,0 мкм. При сушке ИК-излучением теплота от нагретой поверхности распространяется внутрь изделия за счет теплопроводности высушиваемого изделия. К источникам инфракрасного излучения относят тепловые электролампы мощностью 250—1000 Вт с отражательной поверхностью внутри лампы, а также металлические проводники (электрические сопротивления) в виде пластин, плит, спиралей из проволоки, обеспечивающие интенсивность излучения 0,2—0,9 Вт/см^2.

Основное преимущество этого метода — сокращение времени процесса сушки в два-три раза за счет отсутствия термического сопротивления слоев (пленки) воздуха остывающего изделия; для инфракрасных лучей этот слой является "теплопрозрачным".

Температура сушки изделий напрямую связана с температурой излучателя, которая равна 250—300 °С; расстояние излучателя от поверхности изделий должно быть около 100 мм. Изделия с большими высотами (более 50 мм) рекомендуется сушить с применением двухстороннего облучения. Расход теплоты на испарение 1 кг влаги равен около 714 кДж. Существует возможность комбинированного применения радиационного и конвекционного методов. В этом случае длительность сушки сокращается в два-три раза по сравнению с радиационным методом и в пять раз и более по сравнению с конвекционным.

Известен и третий метод сушки — высокочастотный нагрев, который сокращает длительность сушки в 20—30 раз вследствие ряда его особенностей. Так, например, при его использовании изделие внутри становится нагретым выше на 5—15 °С, чем на поверхности, т. е. тепловой поток направляется от центра изделия к периферии, что совпадает с направлением движения влаги к поверхности изделия и т. д. Однако этот метод является дорогостоящим — расход электроэнергии на 1 кг испаренной влаги составляет 34492 Дж против 20935 Дж, расходуемых при конвекционном методе.

Проведение процесса сушки. Сушку абразивных заготовок производят в туннельных и камерных сушилах при максимальной температуре 100—120 °С. В качестве теплоносителя используют: горячий воздух из зоны охлаждения туннельных печей, воздух из специально установленного в цехе газового подтопка или воздух, нагреваемый электрическим калорифером. Тяга в газовом подтопке должна быть не менее 2—4 мм вод. ст. Давление газа на горелках 10—50 мм вод. ст., температура теплоносителя — не выше 280 °С.

Режим сушки характеризуется температурой, относительной влажностью теплоносителя и скоростью его движения, а в случае радиационного метода также и температурой излучателя [7]. Скорость сушки выбирается в зависимости от размеров высушиваемых изделий и их характеристики. Количество связки, содержащейся в изделиях, не оказывает существенного влияния на изменение скорости сушки, однако при увеличении количества связки всегда наблюдается повышенное содержание влаги в изделии, а это требует удлинения процессов сушки. Как правило, начальная температура сушки 40—50 °С, конечная — 100—120 °С. Для заготовок высотой 200 мм и больших диаметров (750—1100 мм), а также мелкозернистых заготовок первоначальная температу-

ра уменьшается до 30 °С. С увеличением номера зернистости заготовок продолжительность сушки при прочих равных условиях сокращается.

Это объясняется тем, что испарение влаги происходит преимущественно с поверхности зерна, и чем меньше зерно, тем более развитой будет поверхность и тем интенсивнее будет испарение.

Среда, в которой производится сушка изделий, обычно характеризуется относительной влажностью φ воздуха (как поступающего, так и отходящего). Так, например, при использовании тепла остывающих обожженных изделий (из зоны охлаждения туннельной печи) относительная влажность поступающего горячего воздуха ψ = 15–20 %, а воздуха, отходящего от сушила, 35–50 %.

Давление газовой среды в сушиле в целях достижения наибольшего равномерного распределения температуры должно быть положительное и внизу сушила ("на поду") составлять около 2,0–3,9 мм вод. ст. Однако положительное давление приводит к вытеснению горячего воздуха через двери и другие неплотности сушила. Поэтому в случае использования для сушки изделий дымовых газов во избежание задымления рабочего помещения применять положительное (избыточное) давление не рекомендуется. В случае отрицательного давления (разрежения) необходимо создание специальных условий для перемешивания горячего воздуха в сушиле и плотной его герметизации (входной и выходной его частей).

Режимы сушки (усредненные) в туннельных и камерных сушилах представлены в табл. 3.26. Для контроля режима сушки в сушилах применяются система контрольно-измерительных приборов (КИП) и система автоматического регулирования процессом сушки, контролирующая и регулирующая параметры теплоносителя, поступающего в рабочую камеру сушила, и в ряде

Таблица 3.26

Режимы сушки заготовок кругов в сушилах

Размеры заготовок, мм		Марка абразивного материала	Время сушки по зонам, ч			Общее время сушки, ч
Диаметр	Высота		в зоне подогрева	в зоне интенсивной сушки	в зоне окончательной сушки	
В туннельных сушилах						
200–300	16–125	24А	8 ±0,25	8 ± 0,25	8 + 0,25	24 + 1
350–400	16–40	14А	8 ±0,25	8 ± 0,25	8 + 0,25	24 + 1
450–500	63–200	50–12	8 ±0,25	8 ± 0,25	8 ± 0,25	24 + 1
500–600	10–25	63С	8 ±0,25	8 ± 0,25	8 ± 0,25	24 + 1
750–900	35–37	63С	8 ±0,25	10 + 0,25	8 ± 0,25	26 + 1
600–750	33–86	50–12	8 ±0,25	10 + 0,25	8 ± 0,25	26 + 1
900	20–43	63С	8 ± 0,25	10 + 0,25	8 ± 0,25	26 + 1
450–500	125–200	24А, 14А	9 + 0,25	18 + 0,25	9 + 0,25	36 + 1
600	100–125	50–12	9 + 0,25	18 + 0,25	9 + 0,25	36 + 1
750	60–80	50–12	9 + 0,25	18 + 0,25	9 + 0,25	36 + 1
900	50–78	63С	9 + 0,25	24 + 0,25	9 ± 0,20	42 + 1
1000–1100	28–43	50–12	9 + 0,25	24 + 0,25	9 ± 0,20	42 + 1

Размеры заготовок, мм		Марка абразивного материала	Время сушки по зонам, ч			Общее время сушки, ч
Диаметр	Высота		в зоне подогрева	в зоне интенсивной сушки	в зоне окончательной сушки	
В камерных сушилах						
150–400	16–200	25А, 14А 50–12	–	5 + 0,25	Естественное остывание после отключения сушки – около 12 ч	~17+ 1
250–400	–		–	5–6 ± 0,25		~17+1
450–500	–	М50–М20	24	24		60 + 1
600	–	63С, 50–12	–	8 + 0,25		20 + 1

случаев управляющая также процессом загрузки и выгрузки материала по заранее заданной программе.

Оборудование для сушки. По способу перемещения высушиваемых изделий сушила разделяют на сушила непрерывного и периодического действия. В сушилах непрерывного действия изделия движутся и постоянно нагреваются, пока не выйдут из зоны максимального нагрева, в сушилах периодического действия изделия остаются на месте, но температура развивается постоянно до указанного максимума, после чего производится разгрузка сушила, затем цикл сушки повторяется снова.

По способу нагрева различают конвекционные, радиационные и высокочастотные сушила.

По конструкции, исходя из формы сушильного пространства и способа перемещения изделий, сушила разделяют на туннельные, конвейерные, камерные и др.

Туннельные сушила непрерывного действия бывают прямоточные и противоточные. В прямоточных сушилах направление движения горячего воздуха (газа) совпадает с движением изделия в сушиле, а в противоточных изделия двигаются навстречу подаваемому горячему воздуху. Прямоточные сушила применяются в тех случаях, когда допустима большая скорость сушки в первый период. Противоточные сушила допускают большие скорости только в конце процесса сушки изделия.

Туннельное сушило представляет собой длинный канал, в котором горячий воздух подается непрерывно, а изделия, установленные на вагонетки, движутся по каналу (туннелю) с равномерной скоростью. Загрузка вагонеток сушила осуществляется с одного конца туннеля, а выгрузка через определенный промежуток времени — с другого конца.

В случае сушки крупногабаритных заготовок кругов сушильные вагонетки оборудованы колесами и амортизаторами для обеспечения плавности хода. Движение вагонеток в туннельных сушилах производится с помощью механического толкателя. Рельсы сушил и путей на электролафете, на котором стоит сушильная вагонетка, должны находиться на стыках на одном уровне.

В некоторых сушилах металлические этажерки с абразивными заготовками перемещаются в продольном направлении пластинчатым транспортером (рис. 3.41). В этом случае сушило оборудовано электрокалорифером и центро-

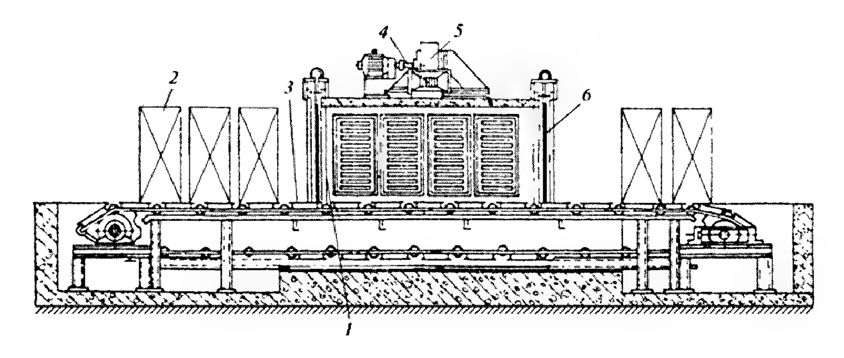


Рис. 3.41. Туннельное сушило с пластинчатым конвейером:
1 — камера сушила; 2 — металлическая этажерка; 3 — пластинчатый конвейер;
4 — электрокалорифер; 5 — центробежный вентилятор рециркуляции;
6 — раздвижные двери

бежным вентилятором рециркуляции; со стороны загрузки и разгрузки сушило закрывается раздвижными дверями с механизмами открывания-закрывания.

Этажерка с заготовками абразивного инструмента, уложенными на сушильные плиты различных конструкций, устанавливается на пластинчатый транспортер перед сушилом. При прохождении транспортера на длину одной этажерки первая этажерка выходит из сушила, и весь состав этажерок продвигается на одну позицию, а подготовленная этажерка перед сушилом входит в него. Иногда транспортером передвигают весь состав этажерок на всю длину сушила — в этом случае сушило работает в режиме периодического действия.

Специалистами одного из абразивных заводов разработано и пущено в эксплуатацию четырехкамерное проходное сушило с автоматическим управлением (рис. 3.42) [186], в котором изделия сушатся в четырех сушильных камерах длиной по 25,5 м. Каждая из этих четырех камер имеет свой режим сушки. Время между очередными проталкиваниями устанавливается электронным реле времени. Сушило по длине условно разбито на три зоны (на рис. 3.42 показаны первая и третья зоны). Циркуляция сушильного агента в каждой зоне принудительная поперечная, осуществляется при помощи вентиляторов модели Ц14-46. Теплоноситель — горячий воздух, отбираемый из зоны охлаждения туннельных печей, подается к сушилу дымососом в коллекторы каждой зоны. Из коллектора теплоноситель поступает в смесительные камеры, где происходит его смешение (по принципу смешения в инжекционном смесителе) с частью отработавшего сушильного агента, поданного на рециркуляцию.

Количество теплоносителя по температуре в сушиле регулируется задвижками. Выхлоп отработавшего сушильного агента производится организованно через один отвод первой и третьей зон в поперечный коллектор и дымовую трубу. При этом отпадает необходимость дополнительных вентиляторов для выхлопа отработавшего сушильного агента.

Особенностью такой схемы является подвод теплоносителя после побудителя рециркуляции, чем значительно улучшаются его условия работы, увели-

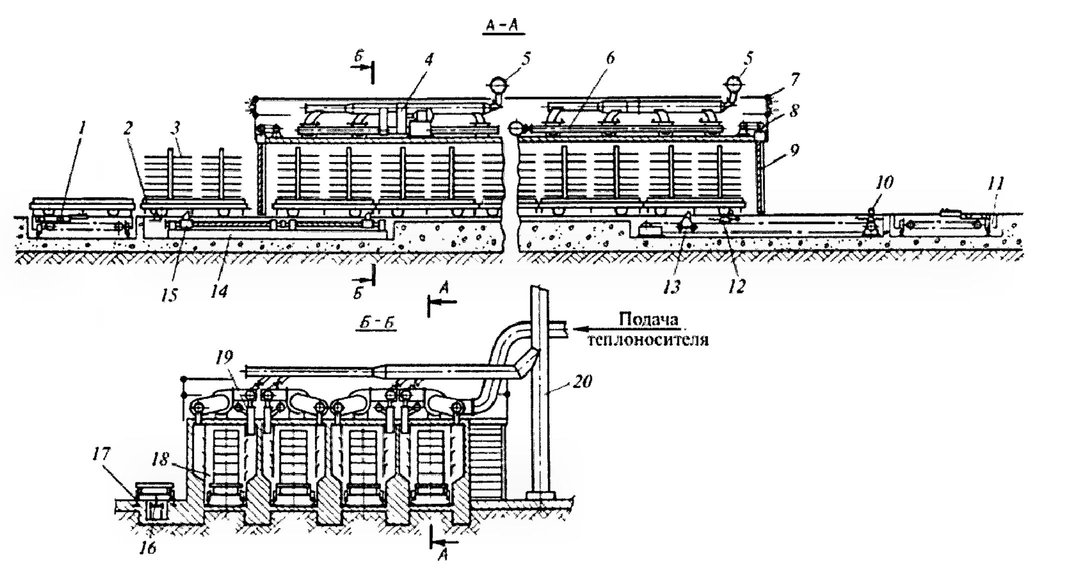


Рис. 3.42. Общий вид сушила четырехкамерного проходного с автоматическим управлением:

1 — цепной механизм сталкивания вагонеток; *2* — вагонетка; *3* — этажерка; *4* — вентиляторная установка; *5* — поперечный коллектор; *6* — коллекторы зон; *7* — фонарь; *8* — привод дверей; *9* — механические двери; *10*, *12* — конечные выключатели; *11* — передаточная тележка; *13*, *16* — цепные толкатели; *14* — винтовой толкатель; *15* — ползун; *17* — обгонные пути; *18* — сушильные камеры; *19* — смесительные камеры; *20* — дымовая труба

чиваются объемы циркулирующего агента сушки, весь теплоноситель участвует в обмене. Это позволяет перейти от схемы с рециркуляцией к схеме с однократным использованием сушильного агента. В целях стабилизации режима сушки давление теплоносителя перед сушилом поддерживается постоянным. Температура контролируется термометрами сопротивления в верхней и нижней зонах сушила. В каждой зоне предусмотрены по две точки контроля.

Благодаря большим объемам (в теплообмене одновременно потребляется до 25000 м^3/ч на камеру) циркулирующего сушильного агента, равномерному распределению по сечению камеры перепад температуры между верхом и низом практически отсутствует, а наличие подвода (отвода) на каждые два метра длины сушила позволяет получать режимы сушки с различной регулируемой степенью рециркуляции.

Сушильные вагонетки и этажерки бывают различных конструкций и размеров в зависимости от ассортимента заготовок и конструкций сушил.

В качестве сушильных плит обычно применяют металлические плиты (стальные, алюминиевые), дырчатые и ребристые (рис. 3.43).

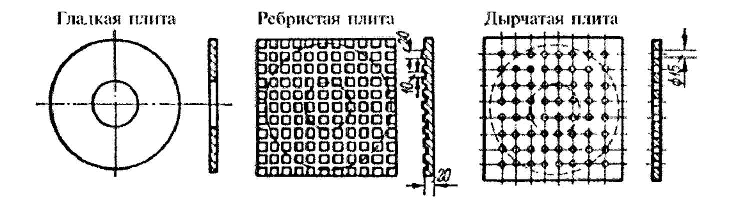


Рис. 3.43. Разновидности сушильных металлических плит

Наиболее рациональным следует считать применение ребристых плит, так как они обеспечивают наиболее равномерную сушку с наибольшей скоростью.

Благодаря наличию сквозных канавок на ребристой плите, расположенных под изделием, воздух имеет возможность омывать и часть нижней поверхности изделия, что создает наиболее благоприятные условия для сушки, в результате которых изделие выходит из сушила с весьма небольшим перепадом влажности между верхней и нижней его поверхностями.

В случае если изделие сушится на гладкой или дырчатой поверхности, то перепад во влагосодержании между верхом и низом более значителен, что отражается на механической прочности изделия и, соответственно, на появлении брака в виде вспучиваний, сколов и трещин.

Туннельные сушила применяются для массовой сушки заготовок инструмента.

Камерные сушила являются установками периодического действия. Они применяются для сушки заготовок крупнозернистого инструмента прямого и фасонного профилей диаметром 600 мм, а также мелкозернистых кругов и брусков всех размеров.

На рис. 3.44 представлена конструкция камерного сушила, работающего на горячем воздухе, нагреваемом в электрокалорифере.

Основной частью камерного сушила является прямоугольная камера, внутри которой устанавливается вагонетка с заготовками абразивных кругов. Сушило оборудовано двойными створчатыми дверями, через которые производится загрузка и выгрузка.

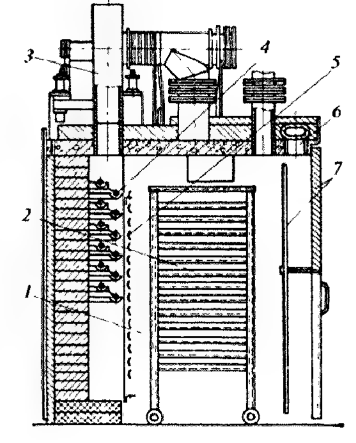


Рис. 3.44. Камерное сушило с вагонеткой:

1 — прямоугольная камера; *2* — металлическая вагонетка; *3* — вентилятор; *4* — нихромовые нагревательные элементы; *5* — жалюзийная решетка; *6* — металлические трубы для отбора и подачи воздуха на рециркуляцию; *7* — створчатые двери

Сушка производится на металлических вагонетках или этажерках (рис. 3.45), на которые устанавливаются круги после формования. В качестве сушильных плит применяются металлические плиты (стальные и алюминиевые).

Как в камерных, так и в туннельных сушилах применяется многократная рециркуляция теплоносителя, осуществляемая центробежными вентиляторами. В камерных сушилах температура и влажность теплоносителя изменяются по времени (вагонетка с кругами в камере сушила неподвижна в течение всего режима сушки). В туннельных сушилах (при установившемся режиме) температура и влажность теплоносителя изменяются только по длине сушила (вагонетка с кругами передвигается по туннелю в соответствии с режимом сушки).

В тепловом отношении туннельные сушила более экономичны, чем камерные, но при этом в туннельных сушилах должно осуществляться круглосуточное непрерывное толкание вагонеток по раз-

Рис. 3.45. Общий вид этажерки для сушки абразивных изделий

работанным режимам — загрузка и выгрузка вагонеток происходит в разных концах туннеля.

Камерные сушила являются установками периодического действия, что позволяет осуществлять различные режимы сушки.

3.4.2. Обжиг абразивных изделий

Под термином "обжиг" понимается процесс нагревания изделия до некоторой заданной температуры, выдерживания его при этой температуре в течение определенного промежутка времени с последующим охлаждением до комнатной температуры.

Цель обжига — вызвать желательные физико-химические изменения в материале черепка, которые обусловливают получение определенных, заранее заданных свойств.

Режим обжига характеризуется: скоростью подъема температуры; конечной температурой обжига; длительностью выдержки при конечной температуре; средой (составом газов), в которой происходит обжиг; давлением (отрицательным или положительным) в печи. Режим охлаждения изделий после их обжига характеризуется только скоростью падения температуры.

Режим обжига должен быть выбран в соответствии с намеченной целью и помимо обеспечения прочности черепка исключать образование брака в изделиях в виде трещин, выпучивания, деформации и т. п.

Весь режим обжига по времени делится на три главных периода: нагревание от комнатной температуры до максимальной температуры обжига, выдержка при этой температуре и охлаждение от температуры обжига до комнатной [187].

К этому основному делению можно добавить, что бывает полезно первый и третий периоды — нагрев и охлаждение — разбить каждый на две части, одна из которых захватывает область низких температур, при которых изделие можно рассматривать как твердое хрупкое тело, другая — область более высоких температур, при которых изделие теряет свою хрупкость и приобретает некоторую пластичность, до максимальной температуры обжига, при которой заканчиваются все физико-химические процессы. Это деление удобно применять при рассмотрении физико-механических напряжений, возникающих в изделиях при обжиге.

Возможны и другие основания для подразделения на отдельные периоды. Так, например, можно делить обжиг на периоды, при которых имеют место только физические изменения, и периоды, в течение которых в черепке наблюдаются химические изменения в результате взаимодействия компонентов связки с абразивным материалом.

Следует отметить, что резкого деления на указанные периоды практически не существует как потому, что изделие в различных своих частях в большинстве случаев имеет различную температуру, так и потому, что те или иные изменения свойств абразивного черепка происходят постепенно, и очень трудно точно установить температуру, при которой круг из хрупкого состояния переходит в пластичное состояние.

Скорость подъема температуры при обжиге абразивных кругов зависит прежде всего от выбранного способа их постановки на печные вагонетки, оп-

ределяющего равномерность нагревания (омывание горячими газами) изделия. При одностороннем нагревании, во избежание значительного перепада температур между периферией кругов и их центральной частью, скорость подъема температур устанавливают сравнительно небольшой, а выдержку при конечной температуре довольно значительной. Как скорость подъема температуры, так и длительность выдержки зависят от размеров изделия, в частности от диаметра кругов: чем больше диаметр кругов, тем меньше скорость подъема температуры и продолжительнее выдержка.

Длительность обжига зависит также от теплопроводности изделий. Изделия из карбида кремния могут быть обожжены по более короткому режиму, чем изделия из электрокорунда, так как теплопроводность карбид-кремниевых изделий значительно выше электрокорундовых. Мелкозернистые изделия, особенно содержащие большие количества связки, о чем уже указывалось, требуют удлиненного режима обжига.

При двухстороннем обогреве изделий (с пропуском газов через отверстие кругов) длительность обжига значительно меньше, так как в этом случае приходится нагревать меньшие объемы — наиболее холодная часть находится не в центре круга, а в точке полуразности диаметров круга и отверстия.

Наиболее коротким может быть обжиг при условии, когда изделие в виде круга нагревается одинаково со всех сторон, как в направлении, перпендикулярном плоскости круга, так и по окружности. Скорость подъема температуры, исходя из указанных зависимостей (размеры, способ постановки, обогрев), различна и колеблется от 5 до 150 °С в час и более. Также различно и время выдержки при конечной температуре, которое колеблется от 1 и примерно до 20–24 ч. Конечная температура обжига, как уже говорилось, зависит от свойств и особенностей связки и может находиться в пределах 1000–1300 °С.

Важное значение для правильного ведения процесса имеет также газовая среда (состав газов) в туннеле печи или камере. Среда, в которой происходит обжиг, начиная с температуры около 850 °С и выше, создается преимущественно окислительная, особенно при обжиге изделий из карбида кремния, с учетом того, что последний частично подвергается разложению.

Состав газов при таком обжиге должен быть примерно такой: 6–10 % O_2 и 5–11 % CO_2 по объему. Удовлетворительной средой при обжиге электрокорундовых изделий следует считать состав газов (в верхней половине туннельной печи) при 1000 °С таким: 14 % CO_2, 19 % (CO_2 + O_2), а при 1200–1250 °С таким: 18–19 % CO_2 и 12–14 % (CO_2 + O_2).

Давление газа в верхней части туннельной печи положительное (около 0,7 мм вод. ст. и несколько ниже), а в нижней части, в зоне подогрева, — отрицательное. В печах периодического действия давление, замеряемое на поду, положительное, колеблющееся от 0 до 2,0 мм вод. ст.

Режим охлаждения — заданное снижение температуры в единицу времени зависит от размеров охлаждаемых изделий. Так как охлаждение кругов происходит главным образом с периферии, то чем больше размеры (диаметр) кругов, тем меньше должна быть скорость падения температуры.

В туннельных печах средняя скорость охлаждения значительно выше (иногда почти вдвое и даже более), чем в периодических.

В начале охлаждения, когда изделия находятся еще в размягченном состоянии, скорость падения температуры может быть относительно большая. С момента начала затвердевания до полного затвердевания всей массы изделия скорость охлаждения, во избежание образования напряжений в изделиях, значительно сокращается. При достижении сравнительно низких температур осуществляется более интенсивное принудительное охлаждение с помощью вентиляционных устройств, отсасывающих горячий воздух из печного пространства или нагнетающих в печь холодный воздух.

Температура 40–50 °С в камере печи периодического действия, где охлаждаются изделия, считается вполне допустимой для разгрузки изделий в помещении цеха, температура которого не ниже +5 °С.

3.4.2.1. Методика расчета предельных скоростей нагрева, охлаждения и времени выдержки абразивных заготовок

Теоретические основы расчета допустимых скоростей изменения температуры при обжиге абразивных кругов, устанавливаемых высокими колонками, разработаны В.Г. Воано [87]. При расчете распределения температуры и напряжений в круге при обжиге колонка кругов рассматривалась как бесконечный полый цилиндр.

Существующая методика расчета предельных скоростей нагрева и охлаждения, времени выдержки абразивных изделий является результатом большого количества работ, выполненных лабораторией термической обработки ВНИИАШ и используется в повседневной практике до настоящего времени (Н.П. Згонник, Ш.Н. Плят, Г.Н. Стародубова, А.К. Ефремов, В.А. Агалаков и др.) [188–191].

Теоретические предпосылки и необходимые для расчетов теплофизические коэффициенты абразивно-керамических черепков, изменяющиеся в процессе обжига, а также коэффициенты теплообмена в туннельных печах подробно изложены в [192–206].

В методике расчета приводятся обобщенные уравнения для приближенного вычисления предельных скоростей нагрева и охлаждения и распределения температур в стопке абразивных кругов при выдержке в условиях всестороннего обогрева и при отсутствии теплообмена на внутренней цилиндрической поверхности кругов [191].

Как известно, при обжиге абразивных изделий при низких температурах в период нагрева (в зависимости от состава связки до 600 °С) и охлаждения (ниже 600 °С) черепок представляет собой хрупкое твердое тело, единственным фактором, по которому можно определить допустимую скорость нагревания или охлаждения, являются температурные напряжения, вызванные изменением температур.

При достижении предельной скорости изменения температуры, когда температурные напряжения по величине оказываются равными пределу прочности черепка, в кругах возникают трещины и разрывы по диаметру. Так как при расчете предельных скоростей изменения температуры учитывается среднее значение предела прочности черепка, а в условиях производства по причине недостаточно однородного смешивания и укладки смеси в пресс-формы ло-

кальная прочность черепка может оказаться значительно ниже средней, то во избежание появления брака в виде трещины допустимые скорости изменения температур в указанные периоды должны быть, по крайней мере, в два раза меньше предельных.

При повышении температуры обжига наиболее легкоплавкие компоненты связки расплавляются, количество жидкой фазы постепенно нарастает и черепок переходит в пластичное состояние, при котором скорость изменения температуры как при нагревании, так и при охлаждении не лимитируется, поскольку возникающие напряжения релаксируются (при условии, что рецептура изделий и способ их установки в обжиг выбраны и осуществлены правильно и они не подвержены деформации под собственным весом или весом вышележащих изделий).

Для получения кругов, возможно более однородных по физико-механическим свойствам, необходимо обеспечить их равномерный прогрев при максимальной температуре обжига. Для этого практически оказывается достаточным, чтобы температурный перепад между ведущими и отстающими точками круга* не превышал 10 °С. При разработке рационального режима обжига кругов важным является определение минимального времени их выдержки при конечной температуре обжига, обеспечивающего однородность температурного поля, особенно в изделиях средних и крупных размеров и тем более установленных в колонки по несколько штук.

Интенсивное охлаждение изделий при высоких температурах, когда черепок еще находится в пластичном состоянии, не только возможно, но и желательно, так как это предотвращает кристаллизацию связки и повышает прочность инструмента при определенных составах связок [46].

Следующий период охлаждения — период перехода черепка из вязкого состояния в хрупкое — является наиболее опасным: наличие градиента температур и неодновременность отвердения черепка по всему объему изделия при последующем выравнивании в нем температурного поля создают напряжения и вызывают рваные трещины в еще пластичной части круга.

Если же выравнивание температуры в изделии происходит при полном переходе черепка в хрупкое состояние, то в зависимости от величины напряжений круг разрывается на части или остается в напряженном (в большей или меньшей степени) состоянии под действием остающихся напряжений. Для установления допустимой скорости охлаждения вычисленные предельные скорости следует уменьшить в четыре-пять раз.

В завершающий период охлаждения скорости лимитируются временными температурными напряжениями в хрупком теле круга, исчезающими при выравнивании температурного поля в объеме круга. При охлаждении изделий с постоянным градиентом температур, образовавшимся еще при переходе тела в хрупкое состояние (при постоянстве коэффициентов линейного расширения материала), напряжения в них отсутствуют. Следовательно, скорость охлаждения в последний период может быть заметно увеличена.

---

* Под ведущей точкой круга понимают ту часть круга, которая первой вошла в соответствующую температурную зону обжига.

Из сказанного следует, что при разработке рационального режима термической обработки предельные скорости нагрева и охлаждения кругов необходимо вычислять главным образом для периодов хрупкого состояния черепка и перехода его из вязкого состояния в хрупкое. Для крупногабаритных изделий, особенно установленных в стопки, должно быть определено и минимальное время их выдержки при максимальных температурах обжига, обеспечивающее заданную степень однородности их прогрева.

Ниже приводится пример расчета для кругов, установленных в стопку высотой 50, 100, 200 и 400 мм и твердостью СМ2—СТ2. Для проведения расчетов введем обозначения и расчетные формулы, предложенные авторами [37, 41, 57].

Принятые обозначения и расчетные формулы: t — температура, °С; t_0 — начальная температура тела, °С; t_c — температура среды, °С; τ — время, ч; r — радиус, м; r_{min} — радиус расположения точки с минимальной температурой, м; R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы полого цилиндра, м; z — координата по высоте цилиндра, м; $2b$ — полная высота цилиндра, м:

$$K = \frac{R_1}{R_2}; \quad \varepsilon = \frac{R_1}{b}; \quad m = \frac{R_1}{R_2}; \quad e = \frac{R_2}{b},$$

α_t — коэффициент линейного расширения, °С$^{-1}$; E — модуль упругости, МПа; σ_c^{u} — предел прочности черепка на изгиб, МПа; λ — коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град); C_p — удельная теплоемкость, ккал/(кг·град); δ — объемный вес, кг/см^3; $a = \dfrac{\lambda}{C_p\delta}$ — коэффициент температуропроводности, м^2/ч; α — коэффициент теплоотдачи, ккал/(м^2·ч·град); α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях, ккал/(м^2·ч·град); $\mathrm{Bi}_1 = \dfrac{\alpha_1 R_1}{\lambda}$; $\mathrm{Bi}_2 = \dfrac{\alpha_2 R_2}{\lambda}$ — критерии Био для цилиндра; $\mathrm{Bi}_{пл} = \dfrac{\alpha b}{\lambda}$ — критерий Био для пластины; $\mathrm{Fo}_1 = \dfrac{a\tau}{R_1^2}$; $\mathrm{Fo}_2 = \dfrac{a\tau}{R_2^2}$ — критерии Фурье для цилиндра; $\mathrm{Fo}_{пл} = \dfrac{a\tau}{b^2}$ — критерий Фурье для пластины; c — скорость изменения температуры, °С/ч; $I_0(x)$, $Y_0(x)$ — функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода; $I_1(x)$, $Y_1(x)$ — функции Бесселя первого порядка первого и второго рода; $h = \dfrac{\alpha}{\lambda}$ — относительный коэффициент теплоотдачи, 1/м; $h_1 = \dfrac{\alpha_1}{\lambda}$ — относительный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности полого цилиндра, 1/м; $h_2 = \dfrac{\alpha_2}{\lambda}$ — относительный коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности полого цилиндра, 1/м; $h_2/h_1 = \psi$;

$$U_0\left(\mu_n \frac{r}{R_1}\right) = \left[I_0(\mu_n) + \frac{\mu_n}{\mathrm{Bi}_1} I_1(\mu_n)\right] Y_0\left(\mu_n \frac{r}{R_1}\right) - \left[Y_0(\mu_n) + \frac{\mu_n}{\mathrm{Bi}_1} Y_1(\mu_n)\right] I_0\left(\mu_n \frac{r}{R_n}\right); \quad (3.4)$$

$$U_i\left(\mu_n \frac{r}{R_1}\right)=\left[I_0(\mu_n)+\frac{\mu_n}{\mathrm{Bi}_1}I_1(\mu_n)\right]Y_1\left(\mu_n \frac{r}{R_1}\right)-\left[Y_0(\mu_n)+\frac{\mu_n}{\mathrm{Bi}_1}Y_1(\mu_n)\right]I_1\left(\mu_n \frac{r}{R_1}\right) \quad (3.5)$$

(где μ_n — корень характеристического уравнения для полого цилиндра);

$$\frac{U_0(K\mu_n)}{U_1(K\mu_n)}=\frac{\mu_n}{\psi \mathrm{Bi}_1}(n=1, 2, ..., \infty); \quad (3.6)$$

$$A_n=\frac{2\mathrm{Bi}_1}{\left(\mu_n^2+\mathrm{Bi}_1^2\right)\left[KU_0(K\mu_n)-\frac{2}{\pi \mathrm{Bi}_1}\right]} \quad (3.7)$$

(где A_n — корень разложения для полого цилиндра);

$$\mathrm{ctg}\gamma_m=\frac{\gamma_m}{\mathrm{Bi}_{n1}}, \quad (3.8)$$

(где γ_m — корень характеристического уравнения для пластины);

$$B_m=(-1)^{m+1}\cdot\frac{2\mathrm{Bi}_{пл}\sqrt{\mathrm{Bi}_{пл}^2+\gamma_m^2}}{\gamma_m\left(\mathrm{Bi}_{пл}^2+\mathrm{Bi}_{пл}+\gamma_m^2\right)} \quad (3.9)$$

(где B_m — коэффициент разложения для пластины);

$$\frac{V_0(\nu_n)}{V_1(\nu_n)}=\frac{\nu_n}{\mathrm{Bi}_2}(n=1, 2, ..., \infty), \quad (3.10)$$

(где ν_n — корень уравнения);

$$G=\frac{K^2-1+2\left(\frac{K^2}{\mathrm{Bi}_2}+\frac{1}{\mathrm{Bi}_1}\right)}{\frac{1}{\mathrm{Bi}_2}+\frac{1}{\mathrm{Bi}_1}+\ln K}. \quad (3.11)$$

При всестороннем обогреве предельные скорости c_n изменения температуры при нагреве в интервале 20–600 °С и при охлаждении в интервале 900–600 °С вычисляются по формуле

$$c_n=-\frac{\sigma_u a}{\alpha_t E}\bigg/ R_1^2\frac{A_1 B_1}{\mu_1^2+\varepsilon\gamma_1^2}\left\{\frac{1+\frac{2}{G}}{\mu_1^2\left(K^2-1\right)}\left[\mathrm{Bi}_2 U_0(K\mu_1)+\frac{2}{\pi}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{4}{\pi G\mu_1^2}-U_0\left(\mu_1\frac{r_{\min}}{R_1}\right)\right\}\cos Y_1\frac{z_0}{b}; \quad (3.12)$$

при охлаждении в интервале 600—20 °С

$$c_n = c_{900\text{-}600} - \frac{\sigma_a}{\alpha_t E} / R_1^2 \frac{A_1 B_1}{\mu_1^2 + \varepsilon^2 y_1^2} \left\{ \frac{2}{\mu^2 \left(K^2 - 1\right)} \times \right.$$

$$\left. \times \left[\mathrm{Bi}_2 U_0 \left(K\mu_1\right) + \frac{2}{\pi} \right] - U_0 \left(K\mu_1\right) \right\} \cos\gamma_1 \frac{z_0}{b}. \qquad (3.13)$$

Для охлаждения в интервале 900—600 °С рекомендуется при расчетах допустимых скоростей принимать коэффициент n равным 0,20—0,25.

Когда теплообмен между внутренней цилиндрической поверхностью круга и внешней средой отсутствует, предельные скорости изменения температуры при нагреве в интервале 20—600 °С и при охлаждении в интервале 900—600 °С определяются по формуле

$$c_n = \frac{\sigma_в^и a}{\alpha_t E_2} / R_2^2 \frac{V_1 B_1}{\nu_1 \left(\nu_1^2 + e^2 y^2\right)} \left[\frac{2}{\nu_1 \left(1 - m^2\right)} \mathrm{Bi}_2 V_0 \left(\nu_1\right) - \frac{2}{\pi m} \right] \cos y_1 \frac{z_0}{b}, \qquad (3.14)$$

при охлаждении в интервале 600—20 °С

$$c_n = c_{900\text{-}600} - \frac{\sigma_в^и a}{\alpha_t E} \Bigg/ R_2^2 \frac{\nu_1 B_1 V_0 \left(\nu_1\right)}{\nu_1^2 + e^2 y_1^2} \left[\frac{2\mathrm{Bi}_2}{\nu_1^2 \left(1 - m^2\right)} - 1 \right]; \qquad (3.15)$$

$$\nu_n = \frac{2 V_1 \nu_n}{\nu_n \left[V_0^2 \left(\nu_n\right) + V_1^2 \left(\nu_n - \frac{4}{\pi^2 \nu_n^2} \right) \right]}.$$

При всестороннем обогреве расчет распределения температуры в колонке кругов ведется по формулам, справедливым при достаточной длительности процесса τ:

а) при $h > 2R_2$ (высокая колонка), как в неограниченном полом цилиндре,

$$t = t_0 + C_1 \tau - \frac{C_1 R_1^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} U_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_1} \right) e^{\frac{-\mu_n^2 a (\tau - \tau_1)}{R_1^2}}; \qquad (3.17)$$

б) при $h = 2b < 2R_2$, как в конечном полом цилиндре,

$$t = t_0 + C_1 \tau_1 - \frac{C_1 R_1^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_n B_m}{\mu_n^2 + \varepsilon^2 y_m^2} U_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_1} \right) \times$$

$$\times \cos Y_m \frac{z}{b} e^{-\frac{\left(\mu_n^2 + \varepsilon^2 Y_m^2\right) \alpha (\tau - \tau_1)}{R_1^2}}. \qquad (3.18)$$

Наибольший интерес представляет вычисление температуры на внешней (ведущая точка $r = R_2$) и внутренней ($r = R_1$) цилиндрической поверхности и поверхности минимальных температур (отстающая точка $r = r_{min}$).

Положение поверхности минимальных температур r_{min} приближенно (с точностью до 1–2 мм) можно вычислить по формуле

$$\frac{r_{\min}}{R_1} = \sqrt{\frac{G}{2}}. \tag{3.19}$$

При таком обогреве, когда теплообмен между внешней средой и внутренней цилиндрической поверхностью колонки отсутствует, расчет распределения температуры ведут по формуле

$$t = t_{\text{ср}} - \frac{c_3 R_2^2}{\alpha}\frac{v_1 B_1}{v_1^2 + (eY_1)^2} V_0\left(v_1 \frac{r}{R_2}\right)\cos Y_1 \frac{z}{B} \times$$

$$\times\left[1 - e^{-\frac{(v_1^2+e^2Y_1^2)a[\tau-(\tau_1+t_2)]}{R_2^2}} - \frac{C_2 R_2^2}{\alpha}\frac{V_1 B_1}{v_1^2+(eY_1)^2} V_0\left(v_1\frac{r}{R_2}\right)\cos Y_1 \frac{z}{b}\right]\times$$

$$\times\left[e^{\frac{-(v_1^2+e^2Y_1^2)a[\tau-(\tau_1+t_2)]}{K_1^2}} + \left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)e^{\frac{-(Y_1^2+e^2Y_1^2)\alpha(\tau-\tau_1)}{R_2^2}} - \right.$$

$$\left. - \frac{C_1}{C_2} e^{\frac{-(v_1^2+e^2Y_1^2)\alpha\tau}{R_2^2}}\right]. \tag{3.20}$$

Изменение первых двух корней μ_1 и μ_2 характеристического уравнения для полого цилиндра, коэффициенты разложения A_1 и A_2 и значения функций $U_0(K\mu_1)$, $U_0(K\mu_2)$ и $U_0\mu_1 \frac{r_{min}}{R_1}$ для различных Bi в зависимости от отношения $K = \frac{R_2}{R_1}$ приведены на рис. 3.46–3.48.

Первые два корня λ_m и коэффициенты B_m для неограниченной пластины взяты из книги А.В. Лыкова и Ю.А. Михайлова [19]. В формулах (3.12)–(3.14) выражение $\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{и}} a}{\alpha_t E} = \sigma_0$ характеризует термическую стойкость материала, а остальные члены уравнения отражают геометрические параметры изделий и условия теплообмена. В табл. 3.27 приведены средние значения теплофизических и термомеханических параметров черепков различных характеристик в интервале 20–600 °С при их обжиге и охлаждении и рассчитанные значения σ_0. Термическая стойкость черепка в значительной степени зависит от его твердости (рис. 3.49): при средней твердости — самая высокая, с повышением твердости до Т2 — снижается.

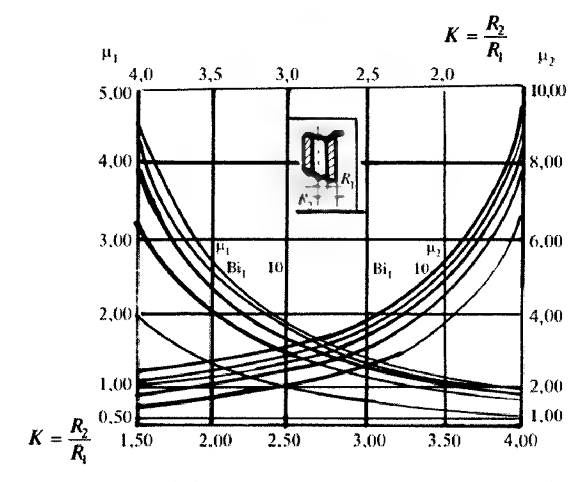


Рис. 3.46. Зависимостей корней μ_n (уравнение 3.6) для различных критериев Bi от $K = R_2/R_1$

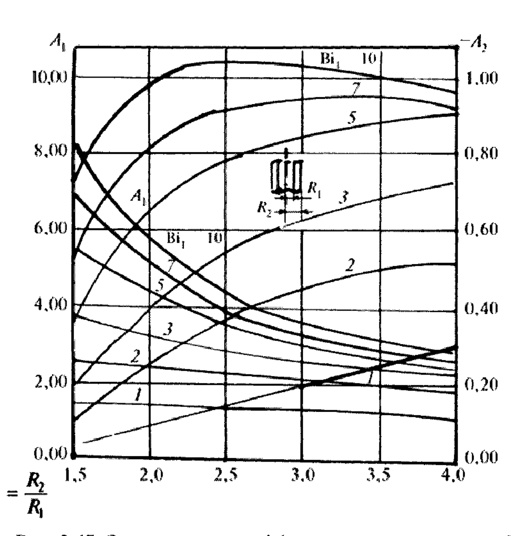


Рис. 3.47. Зависимость коэффициентов разложения A_n для различных критериев Bi от $k = R_2/R_1$

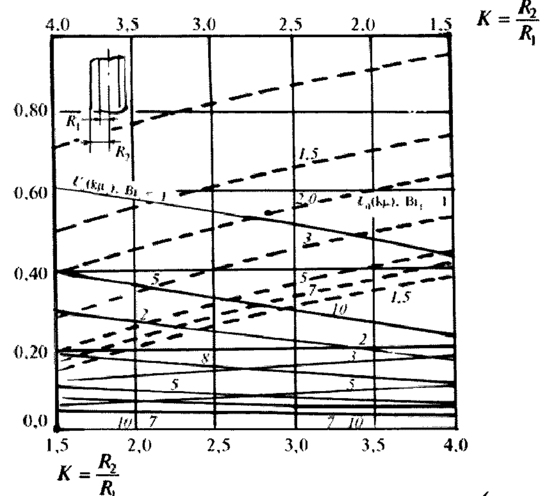


Рис. 3.48. Зависимость функций $U_0(k\mu_1)$, $U_0(k\mu_2)$ и $U_0\left(\mu_1 \frac{r_{min}}{R_1}\right)$ для различных критериев Bi от $K = \frac{R_2}{R_1}$

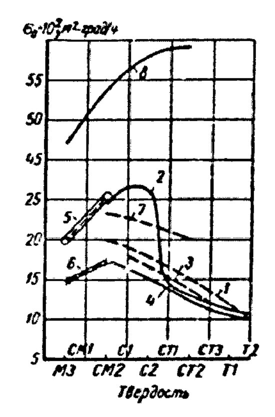


Рис. 3.49. Термическая стойкость абразивно-керамических черенков:

1, 3, 7 — при обжиге; *2, 4, 5, 6, 8* — при охлаждении;
1 и *2* — 24А40; *3* и *4* — 14А40;
5 — 25А16; *6* — 14А16;
7 и *8* — 64С40

Теплофизические и термомеханические характеристики абразивно-керамического черепка при обжиге и охлаждении в интервале 20–600 °С

Абразивный материал	Номер зернистости	Твердость	Период термической обработки	λ, Дж·ч× ×град	Q, м^3/(ч·10^3)	α_t, 1/(°С·10^3)	E, МПа × ×10^5	$\sigma_и$, МПа	$\sigma = \frac{\sigma_и a}{\alpha_t E}$, м^3·град/ч
Электрокорунд белый	40	СМ2	Нагрев	4,37	1,50	9,5	2,0	2,50	0,1974
	40	СТ1		4,90	1,73	9,5	3,0	3,44	0,1648
	40	СТ2		5,27	1,723	9,5	4,6	3,99	0,1530
	40	Т2		5,52	1,804	9,5	7,7	3,99	0,0984
	40	СМ2	Охлаждение	6,51	2,50	8,5	30,0	25,4	0,2490
	40	С2		6.92	2,60	8,5	32,5	27,0	0,2610
	40	СТ1		7,37	2,68	8,5	60,6	27,4	0,1425
	40	СТ2		7,57	2,60	8,5	64.0	27,6	0,1319
	40	Т2		7,70	2,72	8,5	73.0	27,0	0,1184
	16	М3		5,15	2,0	8,5	40,5	34,4	0,1999
	16	СМ2		5.73	2,23	8,5	41,5	42,0	0,2655
	М40	СМ2		4,78	1,93	8,5	47,4	37,8	0,1811
	М40	С2		5,03	2,02	8,5	57,4	36,4	0,1507
	М40	СТ2		5,27	2,02	8,5	73,0	56,5	0,1839
	М40	Т2		5,64	2,17	8,5	71,3	65,0	0,2291
Электрокорунд нормальный	40	С1	Нагрев	4,12	1,41	9,5	2,40	2,90	0,1793
	40	СТ3		4,53	1,60	9,5	5,17	3,78	0,1231
	40	СМ3	Охлаждение	6,10	2,36	8,5	33,0	20,0	0,1683
	40	С1		6,34	2,20	8,5	35,2	21,2	0,1559
	40	С2		6,59	2,55	8,5	43,0	22,5	0,1570
	40	СТ3		6,80	2,40	8,5	67,6	24,0	0,1002
	40	Т2		7.18	2,53	8,5	72.5	27,0	0,1108
	16	М3		4,74	1,86	8,5	39.9	26,9	0,1475
	16	СМ2		5,23	2.06	8,5	40.9	28,9	0.1713
Карбид кремния зеленый	50	М3		13,0	6,29	5,4	32,5	11,7	0,4193
	50	СМ2		16,93	7,11	5,4	42,1	14,4	0,4504
	50	С2		17,88	7,51	5,4	43,0	17,4	0,5802
	40	СМ2	Нагрев	3,58	1,33	5,8	2,45	2,5	0,2303
	40	СТ2		4,16	1,40	5,8	3,55	2,9	0,1972
	40	М3	Охлаждение	13,92	5,84	5,4	37,5	16,3	0,4701
	40	СМ2		16,07	6,74	5,4	41.7	18,1	0,5417
	40	С2		17,14	7,19	5,4	48.7	21,3	0,5821
	40	СТ2		17,40	7,16	5,4	53,5	24,0	0,5946
	12	М3		13,02	5,46	5.4	45.5	22,1	0,4911
	12	СМ2		14,13	5.93	5,4	56,9	3,35	0.6462
	12	С2		15,41	6,47	5,4	70,8	3,46	0,5856

Термическая стойкость черепка электрокорунда белого несколько выше, чем черепка электрокорунда нормального; термическая стойкость черепка карбида кремния в результате обжига возрастает в 2–2,5 раза. Коэффициент теплоотдачи α в туннельных пламенных печах для температурного интервала 20–600 °С равен 30, для 600–900 °С — 45 и для интервала 900–1280 °С — 60 ккал/(м^3·ч·град).

Расчет предельных скоростей нагрева и охлаждения и времени выдержки покажем на примерах.

Пример I. Расчет предельных скоростей нагрева и охлаждения при всестороннем теплообмене.

Круг 1 1100 × 150 × 305 24А40 СТ1 шестой структуры установлен на огнеупорную плиту толщиной 50 мм.

1. Нагрев от 20 до 600 °С.

Используя приведенные выше графики и таблицу, находим численные значения основных величин и критериев: R_1 = 0,150 м; R_2 = 0,550 м; b = 0,100 м (с учетом толщины подкладной плиты 0,050 м); $K = R_2/R_1 = 3{,}667$; $\varepsilon = \frac{R_1}{b} = 1{,}5$; α = 30 ккал/(м^2·ч·град); λ = 1,19 ккал/(м^2·ч·град); $\mathrm{Bi}_1 = \frac{\alpha R_1}{\lambda} = 3{,}781$; $\mathrm{Bi}_2 = \frac{\alpha R_2}{\lambda} = 13{,}865$; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \frac{ab}{\lambda} = 2{,}521$; $\mu_1 = 0{,}9573$; $\gamma_1 = 1{,}1370$; $\cos\gamma_1 = 1$ (при $z_0 = 0$); $A_1 = 2{,}4797$; $B_1 = 1{,}1949$; $U_0(K\mu_1) = 0{,}107$; $\mu_1^2 + \varepsilon^2\gamma_1^2 = 3{,}8252$; $U_0\left(\mu_1 \frac{r_{\min}}{R_1}\right) = 0{,}477$; $G = 9{,}1175$ [по формуле (3.11)].

Подставляя найденные значения в формулу (3.12), находим предельную скорость нагрева:

$$c_n =\sim \frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{и}} a}{\alpha_t E} / 0{,}0225 \frac{2{,}4797 \cdot 1{,}1919}{3{,}8252} \left[\frac{1{,}2194}{0{,}9164 \cdot 12{,}4469} \times \right.$$

$$\left. \times (13{,}865 \cdot 0{,}107 + 0{,}6366) + \frac{4}{3{,}1416 \cdot 9{,}1175 \cdot 0{,}9164} - 0{,}477 \right] 1 = 97\ ^\circ\text{C/ч}.$$

2. Охлаждение от 900 до 600 °С.

Для интервала температур 900–600 °С термомеханические и теплофизические характеристики принимаем такие же, что и для интервала 600–20 °С:

R_1 = 0,150 м; R_2 = 0,550 м; b = 0,100 м; K = 3,667; ε = 1,5; α = 45 ккал/ /(м^2·ч·град); λ = 1,79 ккал/(м·ч·град); $\mathrm{Bi}_1 = \frac{\alpha R_1}{\lambda} = 3{,}771$; $\mathrm{Bi}_2 = \frac{\alpha R_2}{\lambda} = 13{,}8268$; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \frac{ab}{\lambda} = 2{,}514$; $\mu_1 = 0{,}9608$; $\gamma_1 = 1{,}1363$; $A_1 = 2{,}5581$; $B_1 = 1{,}1947$; $U_0(K\mu_1) = 0{,}1091$; $\cos\gamma_1 = 0{,}4209$; $U_0\left(\mu_1 \frac{r_{\min}}{R_1}\right) = 0{,}4796$; $\mu_1^2 + \varepsilon^2 Y^2 = 3{,}8283$; $G = 9{,}1498$.

Подставляя найденные значения в формулу (3.12), находим скорость охлаждения в указанном выше интервале:

$$c_n = -\frac{\sigma_в^и a}{\alpha_t E} \Big/ 0,0225\frac{2,55181\cdot 1,1947}{3,8283}\left[\frac{1,2186}{0,9231(13,4469-1)}\times\right.$$

$$\left.\times(13,8268\cdot 0,1091+0,6366)+\frac{4}{3,1416\cdot 9,1498\cdot 0,9231}-0,4796\right]1 = 66\ °C/ч.$$

Если принять n = 0,25, то допустимая скорость охлаждения при упругопластическом состоянии черепка будет такой:

$$c_{доп} = nc_n = 0,25\cdot 66 \approx 17\ °C/ч.$$

3. Всестороннее охлаждение от 600 до 20 °С.

Здесь R_1 = 0,150 м; R_2 = 0,550 м; b = 0,100 м; K = 3,667; ε = 1,5; γ = = 1,79 ккал/(м·ч·град); α = 30 ккал/(м^2·ч·град); $Bi_{пл} = \frac{\alpha b}{\lambda}$ = 1,676; $Bi_1 = \frac{\alpha R_1}{\lambda}$ = = 2,514; $Bi_2 = \frac{\alpha R_2}{\lambda}$ = 9,2179; μ_1 = 0,8765; γ_1 = 1,0067; A_1 = 2,1667; B_1 = 1,1592; $U_0(K\mu_1)$ = 0,1611; $\cos\gamma_1$ = 0,5346; $U_0\left(\mu_1\frac{r_{min}}{R_1}\right)$ = 0,5606; $\mu_1^2+\varepsilon^2\gamma_1^2$ = 3,0483; G = 8,9495.

Подставляя значения этих параметров в формулу (3.11), получим

$$c_n = c_{900-600} - \frac{\sigma_в^и a}{\alpha_1 E} / 0,0225\frac{2,1667\cdot 1,1592}{3,0483}\times$$

$$\times\left[\frac{2}{0,7682\cdot 12,4469}(9,2179\cdot 0,1611+0,6366)-0,1611\right]1 = 17+23 = 40\ °C/ч.$$

Пример II. Расчет времени выдержки.

Допустим, что круг 1 1100 × 150 × 305 24А40 СТ1 шестой структуры после всестороннего нагрева со скоростью 100 °С/ч выдерживается в среде при температуре 1280 °С. Необходимо произвести расчет времени выдержки и определить температуру в характерных точках круга после выдержки 7 ч.

Во время выдержки происходит переход от линейно изменяющейся температуры к постоянной температуре среды. При достаточной длительности процесса τ расчет распределения температуры в круге ведется по формулам (3.17) и (3.18). При длительности процесса более 2 ч можно использовать в основном значения первых двух корней μ_1 и γ_1 и коэффициентов A_1 и B_1, пренебрегая членами ряда, содержащими корни и коэффициенты с более высокими индексами.

При расчете времени выдержки берутся средние для интервалов 20–600 °С (нагрев) и 900–20 °С (охлаждение) значения λ и a.

Численные значения параметров: $R_1 = 0{,}150$ м; $R_2 = 0{,}550$ м; $b = 0{,}100$ м; $\varepsilon = R_1/b = 1{,}5$; $K = R_2/R_1 = 3{,}667$; $\lambda = 1{,}49$ ккал/(м·ч·град); $C_p = 0{,}288$ ккал/ /(кг·град) (вычислено по удельной теплоемкости компонентов); $\delta = 2334$ кг/м^3 (из рецептуры); $a = 1/C_p\delta = 2{,}20 \cdot 10^{-3}$ м^2/ч; $\alpha = 60$ ккал/(м^2·ч·град) [193, 194]; $Bi_1 = \alpha R_1/\lambda = 6{,}04$; $Bi_{пл} = \alpha b/\lambda = 4{,}027$.

Корни и коэффициенты разложения: $\mu_1 = 1{,}0204$; $\gamma_1 = 1{,}2659$; $A_1 = 2{,}9296$; $B_1 = 1{,}2290$; $U_0(K\mu_1) = 0{,}065$; $\cos\gamma_1 = 0{,}3002$; $U_0\left(\mu_1 \frac{r_{min}}{R_1}\right) = 0{,}4082$; $\mu_1^2 + \varepsilon^2 Y^2 = 4{,}6468$;

$$\frac{a(\tau-\tau_1)}{R_1^2} = \frac{2{,}205 \cdot 10^{-7} \cdot 7}{0{,}0225} = 0{,}686; \quad e^{\frac{-\mu_1^2 a(\tau-\tau_1)}{R_1^2}} = 0{,}4916; \quad e^{\left(-\mu_1^2+\varepsilon^2 Y^2\right)\frac{a(\tau-\tau_1)}{R_1^2}} = 0{,}0413.$$

1. Расчет распределения температуры в колонке кругов неограниченной высоты ведется по формуле (3.17). В ведущей точке ($r = R_2$) внешней цилиндрической поверхности температура

$$t = 1280 - \frac{100 \cdot 0{,}0225}{2{,}205 \cdot 10^{-3}} \frac{2{,}9296}{1{,}0412} 0{,}065 \cdot 0{,}4916 = 1189 \text{ °C}.$$

Температура в отстающей точке поверхности минимальных температур $r = r_{min}$ (отстающая точка)

$$t = 1280 - \frac{100 \cdot 0{,}0225}{2{,}205 \cdot 10^{-3}} \frac{2{,}9296}{1{,}0412} 0{,}4082 \cdot 0{,}4916 = 704 \text{ °C}.$$

Разность температур в ведущей и отстающей точках такова:

$$t = 1189 - 704 = 485 \text{ °C}.$$

2. Расчет распределения температуры в конечном полом цилиндре (колонка высотой в один круг) ведется по формуле (3.18). Если ведущая точка $r = R_2$, $z = b$, то

$$t = 1280 - \frac{100 \cdot 0{,}0225}{2{,}205 \cdot 10^{-3}} \frac{2{,}9296 \cdot 1{,}2290}{4{,}6468} 0{,}65 \cdot 0{,}3002 \cdot 0{,}0413 = 1280 - 0{,}6 = 1279{,}4 \text{ °C}.$$

Разность температур в ведущей и отстающей точках такова:

$$t = 1279{,}4 - 1267 = 12{,}4 \text{ °C}.$$

Расчет показал, что выдержка продолжительностью 7 ч достаточна для удовлетворительного прогрева такого круга. Следует указать, что такая выдержка найдена уже после предварительных расчетов, произведенных при $\tau = 5$ и 6 ч.

Выдержка в течение 5 и 6 ч оказалась недостаточной.

Пример III. Расчет предельных скоростей нагрева и охлаждения для случая, когда теплообмен на внутренней цилиндрической поверхности отсутствует. Данный расчет произведем для круга 1 250 × 250 × 75 24А40 СМ2 шестой структуры.

1. Нагрев в интервале 20–600 °С.

При этом $R_1 = 0{,}0375$ м; $R_2 = 0{,}125$ м; $m = R_1/R_2 = 0{,}3$; $b = 0{,}125$ м; $e = R_2/b = 1{,}0$; $\alpha = 30$ ккал/(м^2·ч·град); $\lambda = 1{,}06$ ккал/(м·ч·град); $\mathrm{Bi}_2 = \alpha R_2/\lambda = 3{,}538$; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \alpha b/\lambda = 3{,}538$; $\nu_1 = 2{,}04$; $\gamma_1 = 1{,}2313$; $V_0(\nu_1) = 0{,}3991$; $B_1 = 1{,}2201$; $V_1(\nu_1) = 0{,}6871$; $\nu_1^2 + e^2\gamma_1^2 = 5{,}6777$; $\vartheta_n = 1{,}2614$ по формуле (3.14).

Найденные значения величин подставляют в формулу (3.12):

$$c_n = -\frac{\sigma_n a}{\alpha_t E} / 0{,}0156 \frac{1{,}2614 \cdot 1{,}2201}{2{,}04 \cdot 5{,}7740} \left(\frac{2}{2{,}04 \cdot 0{,}91} 3{,}538 \cdot 0{,}3991 - 2{,}1226 \right) = 164\ ^\circ\text{С/ч}.$$

2. Охлаждение в интервале 900—600 °С.

При этом $R_1 = 0{,}0075$ м; $R_2 = 0{,}125$ м; $b = 0{,}125$ м; $m = R_1/R_2 = 0{,}3$; $e = R_2/b = 1$; $\lambda = 1{,}58$ ккал/(м^2·ч·град); $\alpha = 45$ ккал/(м^2·ч·град); $\mathrm{Bi}_2 = \alpha R_2/\lambda = 3{,}56$; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \alpha b/\lambda = 3{,}56$; $\nu_1 = 2{,}05$; $\gamma_1 = 1{,}2329$; $V_0(\nu_1) = 0{,}3918$; $B_1 = 1{,}2206$; $V_1(\nu_1) = 0{,}6845$; $\nu_1^2 + e^2\gamma_1^2 = 5{,}7225$; $\vartheta_n = 1{,}2705$ [определено по формуле (3.14)].

Расчет ведем по формуле (3.12):

$$c_n = -\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{и}} a}{\alpha_t E} / 0{,}0156 \frac{1{,}2705 \cdot 1{,}2206}{2{,}05 \cdot 5{,}7225} \times$$

$$\times \left(\frac{2}{2{,}05 \cdot 0{,}91} 3{,}56 \cdot 0{,}3918 - \frac{2}{3{,}1416 \cdot 0{,}3} \right) = 191\ ^\circ\text{С/ч};$$

$$c_{\text{доп}} = nc_n \approx 48\ ^\circ\text{С/ч}.$$

3. Охлаждение в интервале 600—20 °С.

При этом $R_1 = 0{,}0375$ м; $R_2 = 0{,}125$ м; $m = R_1/R_2 = 0{,}3$; $b = 0{,}125$ м; $e = R_2/b = 1{,}0$; $\alpha = 30$ ккал/(м^2·ч·град); $\lambda = 1{,}58$ ккал/(м·ч·град); $\mathrm{Bi}_2 = \alpha R_2/\lambda = 2{,}373$; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \alpha b/\lambda = 2{,}373$; $\nu_1 = 1{,}83$; $\gamma_1 = 1{,}1200$; $V_0(\nu_1) = 0{,}5664$; $B_1 = 1{,}1903$; $V_1(\nu_1) = 0{,}7367$; $\nu_1^2 + e^2\gamma_1^2 = 4{,}6033$; $\vartheta = 1{,}0843$ [получено по формуле (3.14)].

Расчет скорости охлаждения в этом интервале ведем по формуле (3.13):

$$c_n = C_{900-600} - \frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{и}} a}{\alpha_t E} / 0{,}0156 \frac{1{,}0843 \cdot 1{,}1903 \cdot 0{,}5661}{4{,}6033} \left(\frac{2 \cdot 2{,}373}{3{,}3489 \cdot 0{,}91} - 1 \right) = 226\ ^\circ\text{С/ч};$$

Пример IV. Расчет времени выдержки для случая, когда теплообмен на внутренней цилиндрической поверхности отсутствует.

Допустим, что колонка кругов 1 250 × h × 75 25А40 СМ2 шестой структуры, общей высотой 250 мм после нагрева в среде, изменяющей свою температуру по закону ломаной линии со скоростью $c_1 = 100$ °С/ч, $c_2 = 40$ °С/ч, $c_3 = 0$ (на выдержке), находится на выдержке в среде с температурой 1280 °С. Нужно определить температуру в характерных точках после трехчасовой выдержки.

При этом $R_1 = 0{,}0375$ м; $R_2 = 0{,}125$ м; $m = R_1/R_2 = 0{,}3$; $b = 0{,}125$ м; $e = R_2/b = 1$; $\lambda = 1{,}32$ ккал/(м·ч·град); $\alpha = 60$ ккал/(м^2·ч·град); $\mathrm{Bi}_2 = \alpha R_2/\lambda = 5{,}682$; $a = 2{,}00 \cdot 10^{-3}$ м^2/ч; $\mathrm{Bi}_{\text{пл}} = \alpha b/\lambda = 5{,}682$; $\nu_1 = 2{,}27$; $\gamma_1 = 1{,}3382$.

Для ведущей точки $V_0(\nu_1) = 0{,}2480$; $B_1 = 1{,}2454$.

Для отстающей точки $V_0(mv_1) = 2/\pi m v_1 = 0{,}9353$; $v_1^2 + \varepsilon^2 v_1 = 6{,}9437$; $V_1(v_1) = 0{,}6276$; $\vartheta = 1{,}4678$ по формуле (3.20); $\tau_2 = 3$ ч; $\tau_3 = \tau - (\tau_1 + \tau_2) = 3$ ч; $(\tau - \tau_1) = \tau_2 + \tau_3 = 6$ ч. Значения c_1, c_2, c_3 и τ_1, τ_2, τ_3 приняты условно.

Путем подбора различного времени выдержки τ_3 определяется достаточное время для достижения равномерного распределения температуры в круге:

$$e^{-\left(v_1^2+e^2\gamma_1^2\right)\frac{a\left[\tau-(\tau_1-\tau_2)\right]}{r_2^2}} = 0{,}0693;$$

$$e^{-\frac{\left(v_1^2+e^2\gamma_2^2\right)a(\tau-\tau_1)}{r_2^2}} = 0{,}0048.$$

Для конечного цилиндра расчет ведем по формуле (3.20).

В ведущей точке при $\tau = 3$ ч температура

$$t = 1280 - \frac{40 \cdot 0{,}156}{2{,}00 \cdot 10^{-3}} \frac{1{,}4678 \cdot 1{,}2454}{6{,}9437} 0{,}2480 \cdot 0{,}2305(0{,}0693 + 1{,}5 \cdot 0{,}0048) =$$

$$= 1280 - 0{,}3 = 1279{,}7\ ^\circ\text{C},$$

в отстающей точке

$$t = 1280 - \frac{40 \cdot 0{,}156}{2{,}00 \cdot 10^{-3}} \frac{1{,}468 \cdot 1{,}2454}{6{,}9437} 0{,}9353(0{,}0693 + 1{,}5 \cdot 0{,}0048) =$$

$$= 1280 - 5{,}9 = 1274{,}1\ ^\circ\text{C}.$$

Разность температур в ведущей и отстающей точках такова:

$$t = 1279{,}7 - 1274{,}1 = 5{,}6\ ^\circ\text{C}.$$

Рассчитанные скорости нагрева, охлаждения и время выдержки (в часах) для кругов, установленных в стопки разной высоты b, приведены в табл. 3.28. Для установления запаса прочности необходимо принимать запас прочности при температуре 20—600 °С минимум двукратный, а в интервале 900—600 °С — четырехкратный.

Для получения черепка с максимальной прочностью и стабильной твердостью при обжиге электрокорундовых инструментов выдержка должна составлять не менее 4 ч, а при обжиге инструментов из карбида кремния во избежание появления "черных пятен" на нем она должна быть не менее 5—6 ч [198]. Это следует учитывать при установлении рационального режима термической обработки указанных изделий.

Процессы, протекающие в изделиях во время обжига и охлаждения

Процессы, происходящие в кругах в результате нагрева и охлаждения, вызывающие расширение и сжатие последних, принято называть термомеханическими процессами.

Если рассматривать абразивный круг как твердое тело, в котором возникает разность температур, то вследствие различного термического расширения в нем будут возникать напряжения, вызывающие упругие деформации. Более нагретые участки при этом будут испытывать сжатие, так как близкие к ним холодные участки не дадут нагретым расширяться при подъеме температуры.

Таблица 3.28

Предельные скорости нагрева и охлаждения, °С/ч, и время выдержки, ч, для кругов различных типоразмеров

Характеристика кругов и высота стопки кругов *b*, мм	Способ обогрева	Скорость нагрева от 20 до 600° С	Скорость охлаждения в интервале		Время выдержки при 1280 °С, ч
			900–600 °С	600–20 °С	
1 250 × 40 × 32 25А 40 СМ2, структура 6; *b* = 250	Односторонний с внешней стороны	125	70	90	3,0
1 250 × 40 × 75 25А 40 СМ2, структура 6; *b* = 250	То же	164	191	226	3,0
1 350 × 40 × 127 14А 40 С1, структура 6; *b* = 250	"	100	87	93	3,5
1 300 × 40 × 75 14А 40 С1, структура 6; *b* = 250	"	108	82	98,5	3,5
1 450 × 50 × 127 14А 40С1, структура 6; *b* = 250	Всесторонний	224	156	99	4,0
1 500 × 50 × 203 14А 40 С1, структура 6; *b* = 250	"	239	216	123	3,5
1 600 × 150 × 305 25А 40 СТ1, структура 6; *b* = 250	"	250	206	117	3,0
1 750 × 130 × 305 14А 40 СТ3, структура 6; *b* = 200	"	154	125	67	4,5
1 900 × 130 × 305 25А 40 ст1, структура 6; *b* = 180	"	154	122	69	6,0
1 1100 × 150 × 305 25А 40 СТ1, структура 6; *b* = 200	"	97	66	40	7

Холодные участки, наоборот, оказываются растянутыми под влиянием расширения соседних, более горячих участков.

При нагревании или охлаждении тела снаружи (передача тепла от горячего к холодному), что имеет место при обжиге и остывании абразивных кругов, внешние слои круга будут нагреты больше, чем внутренние, а при остывании внутренние слои будут остывать медленнее наружных, разность температур при этом будет тем меньше, чем выше температуропроводность круга.

Вследствие разности температур между внешними и внутренними частями тела (круга) в последнем возникают напряжения, значение которых зависит от целого ряда термомеханических свойств абразивно-керамической смеси, из которой изготовлен круг.

Если напряжения по их величине превзойдут прочность черепка круга, то в этом месте черепок разрушится — образуется трещина.

К числу основных термических характеристик абразивно-керамических смесей следует отнести: коэффициент термического расширения, модуль упругости, температуропроводность и другие характеристики, значения которых не могут не влиять на образование внутренних напряжений, возникающих в нагреваемом или охлаждаемом изделии — круге.

Значения указанных характеристик и методы их определения приведены в гл. 4.

Здесь следует остановиться лишь на вопросе изменения этих показателей с изменением температуры. Характер изменения коэффициента линейного расширения с изменением температуры образца из белого электрокорунда зернистости 46, твердости С1 и структуры 6, заформованного из смеси, приготовленной на одной из плавящихся связок с увлажнителем растворимым стеклом, показан на рис. 3.50.

Изменение модуля упругости с повышением температуры представлено на рис. 3.51. Из графика видно, что модуль упругости образцов абразивно-керамических смесей падает с возрастанием температуры. Такое явление имеет весьма существенное значение для выбора скорости подъема температуры при термообработке изделий (кругов). Скорость обжига (нагрева) изделий в связи с этим может увеличиваться с повышением температуры, не влияя при этом на величину напряжений. При понижении температуры (остывании) наблюдается обратная картина — модуль упругости возрастает и, следовательно, возрастают термические напряжения в круге. Температуропроводность абразивно-керамических смесей падает с повышением температуры. Теплопроводность мелкозернистых смесей (№ 220) значительно меньше крупнозернистых (№ 46), поэтому нагрев и охлаждение мелкозернистых изделий (кругов) всегда должны

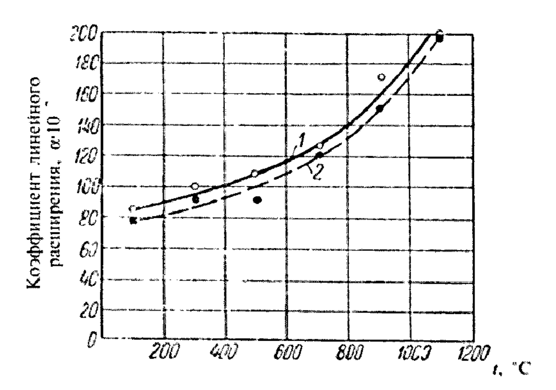


Рис. 3.50. Характер изменения коэффициента линейного расширения с температурой образца из абразивно-керамической смеси:

1 — α при подъеме температуры; *2* — α при охлаждении

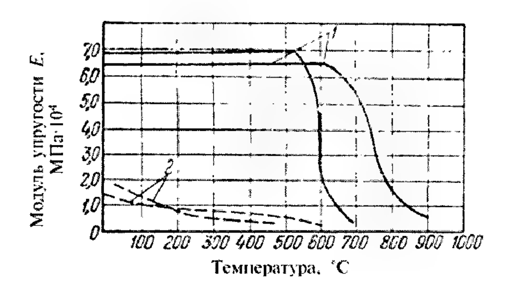


Рис. 3.51. Характер изменения модуля упругости абразивно-керамических образцов, изготовленных на различных связках, в зависимости от температуры:

1 – обожженные образцы; *2* — высушенные образцы

проходить медленнее крупнозернистых, чтобы избежать больших перепадов температур между внешними и внутренними слоями изделия.

Однако не только указанные характеристики влияют на величину внутренних напряжений. Существенное влияние оказывают также скорость нагревания и размеры изделия. Чем скорость нагревания или охлаждения будет больше, тем больше будут и разности температур между внутренними и внешними его слоями, следовательно, тем больше величина напряжений.

При нагревании, а также при охлаждении абразивных кругов возникают радиальные напряжения G_r, расположенные вдоль радиуса круга, и тангенциальные (G_t), расположенные перпендикулярно радиусу. Радиальные напряжения сравнительно невелики и не имеют такого значения, как тангенциальные. Большие по значению тангенциальные напряжения могут привести к образованию у периферии и у центра круга трещин, располагающихся в зоне действия этих напряжений.

На рис. 3.52 показан характер распределения напряжений в круге при одностороннем нагревании. По оси ординат отложены значения *K*, а по оси абсцисс отложен радиус нагретого круга (*K* — некоторая постоянная величина, зависящая от формы, размеров изделия и местоположения в нем точки, в которой определяются напряжения). Как видно из графика, характер распределения тангенциальных и радиальных напряжений различен, а абсолютные значения тангенциальных напряжений больше, чем радиальных.

На рис. 3.53 показан характер распределения напряжений при двухстороннем нагревании круга диаметром 900 мм с отверстием диаметром 305 мм.

При сравнении двух приведенных графиков обращают на себя внимание весьма заниженные абсолютные значения *K* в круге диаметром 900 мм, обогреваемом одновременно снаружи и из центра. Это обстоятельство указывает на целесообразность применения двухстороннего обогрева, при котором значение напряжений будет всегда меньше, чем при одностороннем нагревании.

При нагревании изделий сначала происходит удаление остатков влаги и разложение клеящих увлажнителей (декстрина). Это приводит к некоторому

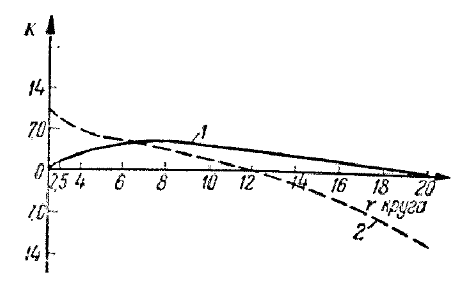


Рис. 3.52. Характер распределения напряжений в круге 400 × *h* × 50 при одностороннем нагревании:

1 — радиальные напряжения G_r;
2 — тангенциальные напряжения G_t

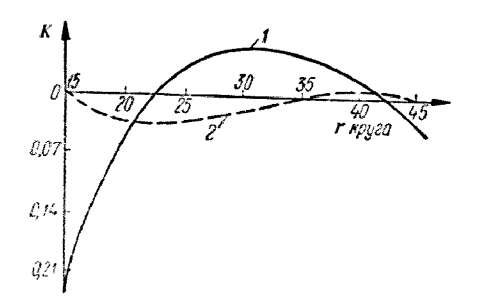


Рис. 3.53. Характер распределения напряжений в круге 900 × *h* × 305 при двухстороннем нагревании:

1 — радиальные напряжения G_r;
2 — тангенциальные напряжения G_t

снижению прочности изделий, особенно в интервале температур 450–750 °С. Указанный период является наиболее опасным участком подъема температуры, так как при быстром подъеме температуры в круге могут возникнуть внутренние напряжения, большие значения которых в малопрочных изделиях могут привести к образованию трещин. Дальнейший подъем температуры вызывает постепенное расплавление жидкого стекла и связки, что приводит изделие в размягченное пластичное состояние. Напряжения, возникающие в круге, при этом не сохраняются, а гаснут за счет перераспределения вещества круга. Быстрый подъем температуры в этом периоде при обжиге любых абразивных кругов (корундовых — благодаря пластичному состоянию, карборундовых — благодаря высокой теплопроводности) не вызывает опасений в отношении внутренних напряжений. Длительность этого периода определяется временем, необходимым для взаимодействия связки с абразивным зерном.

Период повышения температур от 750 °С до конечной температуры обжига характерен тем, что среда в этом периоде должна быть нейтральная или окислительная.

Указанное обстоятельство вызвано необходимостью исключить возможность получения в процессе обжига дефектных изделий — зауглероженных и с черными пятнами. Проведение обжига изделий в восстановительной среде (газы с большим содержанием CO) не может обеспечить удаления продуктов разложения карбида кремния, которые образуются именно в указанной зоне температур.

По достижении конечной температуры обжига обычно производится выдержка при этой температуре в целях выравнивания ее во всем объеме изделия. При этом происходит, как говорят, "провар связки", т. е. окончание процесса стеклообразования или спекания (в зависимости от того, какая связка применена).

Конечная температура обжига и длительность выдержки при конечной температуре зависят от свойств связки и абразивного зерна и характеризуются такими численными значениями времени, при которых изделия получаются при прочих равных условиях максимально высокой прочности.

После окончания выдержки наступает охлаждение изделий, вызывающее нарастание вязкости связки, приводящее к тому, что масса изделия из пластичного состояния переходит в твердое. Этот переход может вызвать в изделиях возникновение "постоянных" напряжений, образующихся вследствие разности температур между внешними (более холодными) и внутренними (более горячими) частями круга. При этом внешние участки будут стремиться сократиться сильнее внутренних, внутренние же участки будут сжаты и, в свою очередь, будут растягивать внешние.

В отличие от постоянных напряжений, которые остаются в круге, могут возникнуть и так называемые временные, исчезающие при выравнивании температуры.

Если значение постоянных напряжений относительно велико и превосходит прочность круга, то последний при выравнивании в нем температуры дает трещину. Если же постоянные напряжения будут меньше прочности круга, то при выравнивании температуры трещины не возникнет, однако оставшиеся

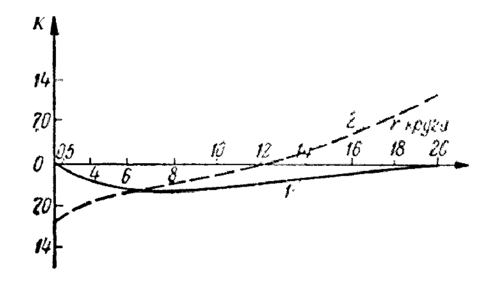


Рис. 3.54. Характер распределения напряжений в круге 400 × h × 50 при одностороннем охлаждении:

1 — радиальные напряжения G_r;
2 — тангенциальные напряжения G_t

напряжения (которые иногда называют остаточными) могут вызвать в остывшем круге его разрушение (разрыв, трещину) под влиянием иногда даже незначительных температурных колебаний окружающей среды или незначительных механических воздействий на него. Таким образом, наличие в круге остаточных напряжений снижает его механическую прочность.

Если охлаждение изделий рассматривать как процесс, противоположный нагреванию, то распределение напряжений в круге, при его охлаждении, графически может выглядеть как зеркальное изображение кривых напряжений при нагревании (см. рис. 3.52 и рис. 3.54).

3.4.2.2. Характеристика печей для обжига абразивных изделий

Высокотемпературный обжиг абразивных изделий осуществляется в туннельных и щелевых печах непрерывного действия и камерных печах периодического действия. В туннельных печах обжигают 95 % абразивного инструмента на керамической связке и примерно 5 % — в щелевых печах и печах периодического действия. Туннельные печи являются высокопроизводительными теплотехническими агрегатами. Их производительность обычно составляет от 5000 до 15000 т изделий/год. Производительность щелевых электрических и газовых печей составляет от 100 до 800 т изделий/год.

Печи периодического действия и щелевые печи уступают туннельным печам по производительности и энергозатратам на 1 т обжигаемых изделий, но они более удобны и экономичны при обжиге инструмента малыми партиями по разным технологическим режимам термической обработки.

Туннельные печи имеют значительную тепловую инерцию из-за большой массы кирпичной кладки стен, свода и вагонеток. Продолжительность разогрева холодной туннельной печи до рабочей температуры составляют 12–17 суток, поэтому туннельные печи работают непрерывно до ремонта, без остановок на выходные и праздничные дни. Внеплановые остановки производятся только из-за аварий, а также при отключении подачи газа или электроэнергии.

Характерной особенностью туннельных печей является постоянство условий, при которых протекает процесс обжига. Основным признаком их является неподвижность зоны обжига, через которую продвигаются обжигаемые изделия.

Туннельные печи

Туннельная печь по своей конструкции представляет собой длинный горизонтальный рабочий канал-туннель, по которому движется состав вагонеток с заготовками абразивного инструмента (рис. 3.55, 3.56), прошедшего предварительную операцию сушки.

Наружная кладка стен и свода выполнена из красного строительного или теплоизоляционного диатомитового кирпича, внутренняя кладка в зоне высоких температур — из динасового и шамотного кирпичей. Свод печи снаружи обмазан огнеупорной глиной, поверх которой уложен шамотный легковесный кирпич и сделана засыпка диатомитовым порошком. Кирпичная кладка туннельной печи скреплена металлическим каркасом, который предохраняет ее от разрушения.

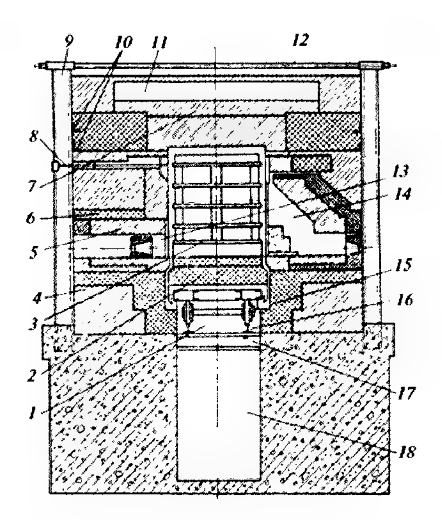


Рис. 3.55. Туннельная печь (поперечный разрез):

1 — рабочий канал (туннель); *2* — состав вагонеток; *3* — этажерка; *4* — диатомитовый кирпич (кладка); *5* — динасовый кирпич; *6* — шамотный кирпич; *7* — шамотный легковесный кирпич; *8* — красный строительный кирпич; *9* — вертикальные стойки каркаса; *10* — горизонтальные пятовые балки; *11* — диатомитовый порошок (засыпка); *12* — поперечные тяги; *13* — щелевые топки; *14* — камерные топки; *15* — песочный затвор; *16* — рельсовый путь; *17* — металлические шпалы; *18* — подвагонеточное пространство

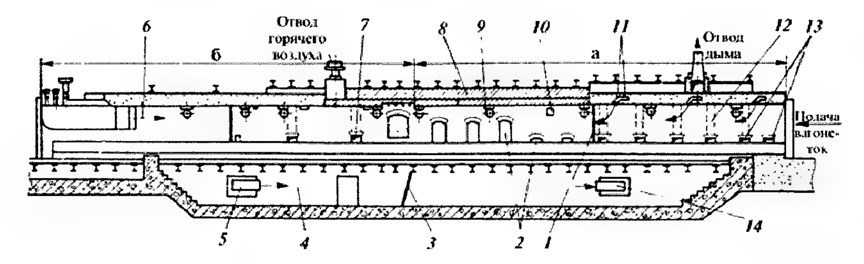


Рис. 3.56. Туннельная печь (продольный разрез):

1 — температурные швы; *2* — топки; *3* — металлические двери для создания гидравлического подпора; *4* — подвагонеточный канал; *5* — короб подачи воздуха на охлаждение ходовой части и рам вагонеток; *6* — направление движения вагонеточного воздуха; *7* — окно для отбора нагретого воздуха к сушилам; *8* — температурные швы свода печи; *9* — установки термопар или радиационных пирометров; *10* — отверстие для наблюдения за газовой средой и движением вагонеток; *11* — отверстия для установки термопар и для установки коробов воздушных завес; *12* — каналы для перемещения газовоздушных смесей; *13* — окна для отбора дымовых газов; *14* — короб для отбора охлаждающего воздуха

В туннельных печах используют камерные и щелевые топки, располагаемые в стенах. Камерные топки раскрываются в рабочий канал на всю высоту садки на вагонетке или же только на 1/2 ее высоты. Щелевые топки располагают по высоте на уровне подины вагонетки. Продукты горения из щелевой топки направляются в подину печной вагонетки под обжигаемые изделия, а из камерной топки — на изделия по всей высоте садки. Кроме вышеназванных типов топок иногда в туннельных печах применяют топки с распределенной выдачей газов. Топочные газы из таких топок выбрасываются в рабочий канал печи через небольшие окна, равномерно распределенные по длине печи. Топки с распределенной выдачей газов делают только в зоне подогрева. В последние годы наблюдается тенденция замены топок с распределенной выдачей газов щелевыми топками с установленными в них высокоскоростными горелками, работающими с большими удельными расходами вторичного воздуха, подаваемого в горелку. Высокоскоростные горелки также используют для организации рециркуляции дымовых газов в рабочем канале печи.

Газ подается по внутренней трубе в горелки, расположенные с левой и правой сторон печи, в топочное пространство, где происходит его сгорание. В целях улучшения теплообмена при обжиге абразивного инструмента горелки целесообразно устанавливать в два ряда по высоте.

Размеры печи, в частности длина туннеля, могут быть различными и зависят от длительности процесса (режима обжига), плотности загрузки, заданной производительности [207—209].

Длину туннельной печи можно вычислить, если известны: ее часовая производительность $G/24$, т/ч; продолжительность термообработки t, ч; емкость одного погонного метра туннеля Fd, т, где F — сечение туннеля, d — плотность загрузки, т/м^3. Вычисление производится по формуле $l = \frac{Gt}{24Fd}$, где l — длина туннеля. Чаще всего встречаются печи, длина которых равна 80—100 м, ширина примерно 1,37 м, высота от пода до замка свода — примерно 1,5 м.

Вагонетки в туннельных печах передвигаются по рельсам, уложенным на металлические шпалы, выполненные из швеллеров. В зоне обжига рельсовый путь собран из укороченных рельсов, так как они меньше искривляются и коробятся из-за значительных температурных расширений (см. рис. 3.50).

Загрузка абразивных изделий в туннельную печь производится на специальные вагонетки (рис. 3.57), представляющие собой собранные на металлической тележке трех-четырех-полочные этажерки из огнеупорного шамота. Размеры основания вагонетки — 2 × 1,5 м. В качестве полок в этажерках служат огнеупорные карбид-кремниевые плиты (ТУ 9200-0220931—99) размерами 570 × 470 × 32 и 380 × 380 × 40 мм с отверстиями в их центрах диаметром 75 и 120 мм или без отверстий. Подставками служат прямые и фасонные кирпичи разной высоты.

Подина вагонетки представляет собой карборундошамотную плиту толщиной 50 мм, под которой по длине вагона размещается четыре огневых канала высотой 135 мм. При выкладке вагонетки плитами размером 380 × 380 мм количество каналов доводится до пяти. Огневые каналы выкладываются в целях равномерного нагрева изделий нижнего яруса. А поэтому они должны быть



Рис. 3.57. Вагонетка туннельной печи

всегда очищены. Остальная часть футеровки (под огневыми каналами), включая замковые кирпичи, выкладывается сплошным огнеупорным материалом.

Загрузка всех кругов, обжигаемых в туннельных печах, диаметром от 100 до 1100 мм, а также абразивных брусков и др. производится открыто на полках вагонетки, как уже было отмечено выше, на три-четыре полки (яруса), причем высота каждого яруса определяется в соответствии с применяемыми подставками и может быть трех видов:

1) общая высота яруса 130 мм, полезная высота 90—70 мм;
2) общая высота яруса 180 мм, полезная высота 120—140 мм;
3) общая высота яруса 260 мм, полезная высота 220—200 мм.

Разрешается изменение порядка установки ярусов (полок) в зависимости от ассортимента изделий.

Плиты на подставках крепят раствором, состоящим из смеси 45 % глины огнеупорной, 45 % шамота и 10 % воды.

Сборка полок (ярусов) вагонетки происходит по мере укладки на первой полке кругов, и затем устанавливается вторая полка, круги на ней и т. д. снизу доверху. При выкладке целого ряда плит или целой полки стыки плит сверху промазываются огнеупорной массой (глиной).

Загрузка кругов на полки вагонетки кругов всех размеров и характеристик производится стопками по технологически допустимым нормам, указанным в картах загрузки, отражающих порядок установки изделий на полки в зависимости от их размеров с максимальным использованием полезной площади.

После загрузки каждая вагонетка пропускается через контрольный габарит для проверки ее размеров по высоте и ширине.

Для создания плотности между вагонетками торцы футеровки вагонеток имеют паз, соответствующий выступу соседней вагонетки, кроме того, стыки уплотняются асбестовым шнуром или асбестовой крошкой, набиваемой в специальные "козырьки".

Для разделения во время движения вагонеток печного пространства от наружной атмосферы, в частности подвагонеточного коридора, в целях исключения нагрева металлических деталей вагонеток, засоса воздуха или прорыва газов, на вагонетках устраивается плотный затвор специальной конструкции (рис. 3.58), выходной и входной концы туннеля оборудуются температурными экранами (запорными вагонетками) и подвесной дверью, качающейся на роликах.

Заталкивание вагонеток в печь производится механическим или гидравлическим толкателем, установленным между рельсами в начале печи с интервалами в соответствии с заданным технологией режимом.

Вагонетки ремонтируются по мере необходимости, при этом чем качественнее производится ремонт с соблюдением требований к огнеупорным деталям, тем реже вагонетки подлежат ремонту (в среднем один раз в 1,5 года), тем менее вероятны завалы.

Ремонт туннельной печи должен производиться через пять-семь лет; продолжительность ремонта — 2–3 мес.

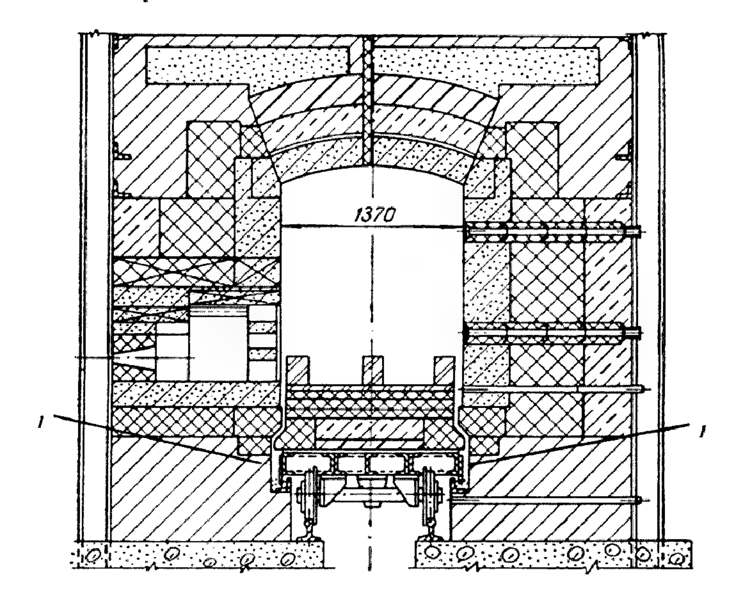


Рис. 3.58. Туннельная печь (фрагмент):
1 — затвор специальной конструкции для вагонетки

Качество обжигаемых изделий в значительной степени зависит от правильности загрузки ("садки") сырца. Загрузка, или как ее еще называют — постановка, производится с учетом создания условий равномерного обогрева изделий — равномерного омывания изделий газами, а также с учетом свойств и особенностей изделий.

Высушенные заготовки устанавливаются в туннельных печах на полки вагонеток в стопку, высота которой лимитируется способностью изделий не деформироваться под тяжестью собственного веса при высокой температуре. В табл. 3.29 представлены варианты способов постановки абразивных заготовок на полки печной вагонетки в зависимости от их размера. В зависимости от ассортимента разработаны также карты загрузки вагонеток (рис. 3.59).

Для создания оптимального теплового и аэродинамического режимов печи необходимо строго соблюдать среднюю плотность садки — не менее 500 кг на вагонетку. В случае отсутствия изделий необходимо дополнительно до этого веса загружать вагонетки балластом (обожженный кирпич, брак, плиты и т. д.).

Изделия при постановке во избежание спекания их между собой в процессе обжига пересыпаются слоем дробленого кварца, кварцевого песка и редко — шамота крупностью от 0,5 до 3,2 мм в зависимости от размера и зернистости абразивного изделия. Насыпав дробленый материал на изделие и разровняв его по поверхности изделия, сверху накладывают второе изделие и притирают его для создания равномерного слоя.

Изделия из карбида кремния, вследствие своих особенностей, требуют при обжиге более значительного газообмена, чем электрокорундовые, во избежание образования на них "черных пятен". В связи с этим постановку карбид-кремниевых изделий отдельные изготовители осуществляют на специальных подставках — плитах — либо формуют изделия с "выступом", на который затем и устанавливают заготовки друг на друга.

Отдельные заготовки кругов, например диаметром 500–700 мм, высотой 100 мм и более, целесообразно устанавливать на огнеупорные плиты с "трубой" (отверстием), что обеспечивает двухсторонний нагрев как снаружи, так и в центре. Циркуляция горячих газов через отверстия изделия создает благоприятные условия для равномерного нагрева последних и способствует сокращению брака ("трещин").

Заготовки высокопористых кругов, как правило, устанавливаются на верхние полки вагонеток по одной штуке на хорошо зачищенные плиты и предварительно подготовленный ровный слой подсыпки.

Заготовки больших кругов диаметром 750–1100 мм и твердостью до СМ1 и Т1–ЧТ1 рекомендуется ставить по одному кругу на полку во избежание брака.

Продолжительность обжига и отдельных его периодов зависит от размеров, формы и свойств формовочной смеси, из которой изготовлен инструмент.

Зная общую продолжительность цикла обжига для каждого вида и размера абразивного инструмента, можно рассчитывать время между подачами вагонеток в печь по формуле

$$t = \tau/n,$$

где τ — продолжительность цикла обжига, ч; n — количество вагонеток в печи, шт.

Таблица 3.29

Варианты способов постановки абразивных заготовок на полки печной вагонетки

Номер полки	Габариты изделия, мм			Число стопок на одной полке	Способ укладки заготовок изделий на полки печной вагонетки
	Диаметр круга	Высота круга	Высота стопки		
1	До 300	Все	До 100	8 и более	Грузить стопками на плиты без отверстия. Комбинированная постановка кругов в стопки
2	До 300	Все	До 100	8 и более	
	350–450	Все	До 100		
	500–600	35–63	До 100	2	
3	175–300	Все	До 160	2	Грузить стопками на плиты без отверстия. Комбинированная постановка кругов
	350–450	Все	До 160	2	
	500–600	35–63	До 220	2	
	500–600	80–150	До 220	2	
	750	40–80	До 160	2	
	750	28–38	До 160	2	Грузить по 1 шт. по центру полки
	800 (шшк)	100	До 160	1–2	
	900	43–52	До 160	1	
	ЧК 125–175	80	До 160	1	Фасон грузить на плоскости всех кругов
	ЗТ 225	Все	–	–	
	ЧЦ 150–300	Все	–	–	
4	До 500	Все	До 160	5	Грузить стопками на плиты без отверстия. Комбинированная установка
	600	25–150	До 160	5	
	750	25–90	До 140	2	Грузить стопками на плиты с “трубой”
	900	Все	До 140	2	
	1060–1100	40–63	До 105	1	
	1060–1100	84–100	До 105	1	
	300–500 высокопористый	80–150	До 220	1	Грузить на дополнительную плиту по 3 шт. на полку
	600 высокопористый	80–150	До 220	1	Грузить на полку с “трубой”
	500	150–200	До 220	1	
	600	150–200	До 220	1	
	«И» 400–450	До 200	До 220	1	Грузить на плиты по 1 шт.
	ЧК 125–175	Все	–	–	
	ЗТ 225	Все	–	–	Грузить на плоскости всех кругов
	ЧЦ 150–300	Все	–	–	

Примечание. шшк — шарошлифовальные круги.

Зная массу инструмента на одной вагонетке и время между подачами вагонеток в печь, можно определить производительность печи:

$$g = G/t,$$

где g — производительность печи, кг/ч; G — масса садки инструмента на одной вагонетке, кг.

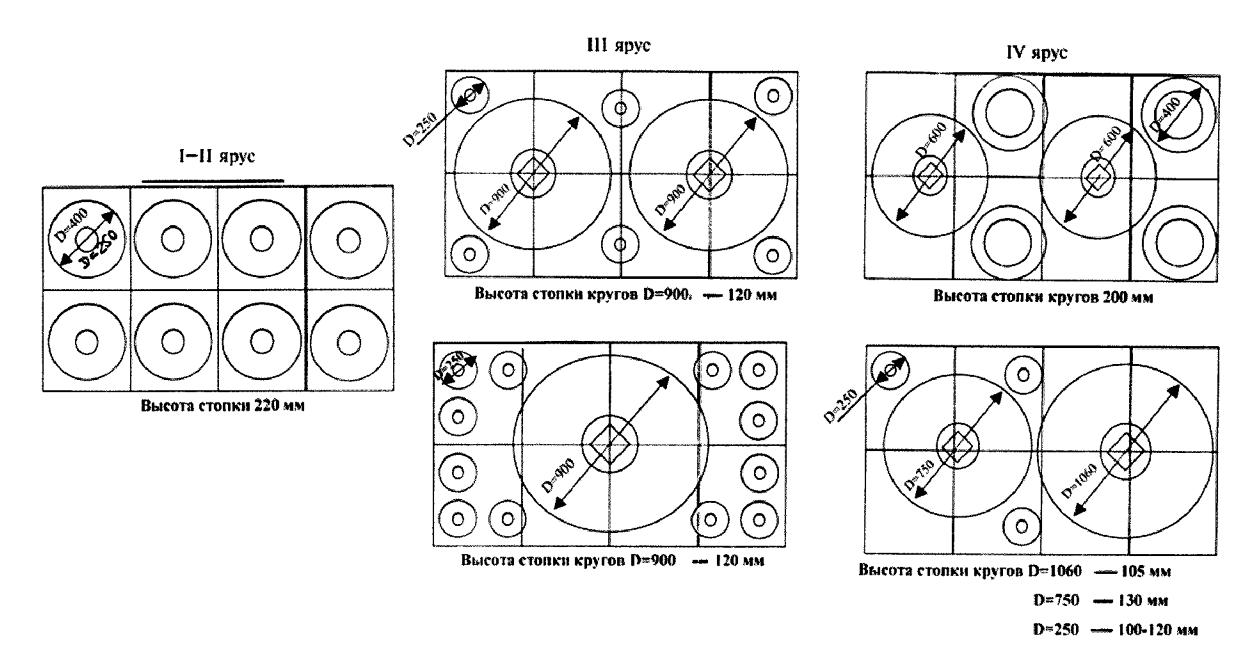


Рис. 3.59. Карты загрузки ярусов вагонетки (пример)

Температурный режим туннельной печи осуществляется согласно заданной кривой обжига и охлаждения (см. рис. 3.54 — пример).

Во всех зонах рабочего канала печи создаются и поддерживаются определенные параметры температурного и гидравлического режимов. Туннельная печь имеет три основные зоны, примерно равные по длине: зону нагрева и выдержки (*а*) и охлаждения (*б*) (рис. 3.60).

Для печей обжига заготовок абразивных изделий из электрокорунда отношение а : б = 45 : 55, а для печей обжига заготовок абразивного инструмента из карбида кремния — а : б = 60 : 40.

В туннельных печах в процессе обжига наблюдается перепад температур по высоте печного канала между верхом и низом, достигающий порядка 50—70 °С. В целях уменьшения температурного перепада своды в печах предлагается делать плоскими. В зоне температур до 1000 °С свод собирают из жаропрочных железобетонных плит, изготовленных из глиноземного цемента. В зоне температур 1000—1400 °С своды выполняют плоскораспорными из специального клинового шамотного кирпича; клиновые кирпичи, расположенные в средней части свода, имеют ступенчатые утоныпения, которые и образуют плоскую внутреннюю поверхность свода [210].

Плоский свод позволяет увеличить высоту садки, уменьшить свободное подсводовое пространство и таким образом улучшить распределение газовоздушных потоков по сечению туннеля.

Увеличение высоты садки повышает производительность туннельных печей, а также снижает удельный расход топлива.

Для отопления туннельных печей используется, как правило, природный газ, редко — мазут. Для подачи газа в топки применяют газовые горелки различных конструкций. Назначение горелок — подача газа и воздуха в топку, обеспечение определенного соотношения газ—воздух (подаваемых на горение), перемешивание продуктов горения в топке. Газовые горелки устанавливаются в зоне подогрева и обжига. Природный газ позволяет легко создавать требуемую газовую среду в печи, улучшает санитарно-гигиенические условия труда (по сравнению с мазутом). Давление газа и воздуха перед горелкой должно быть $(1-3)\cdot 10^3$ Па.

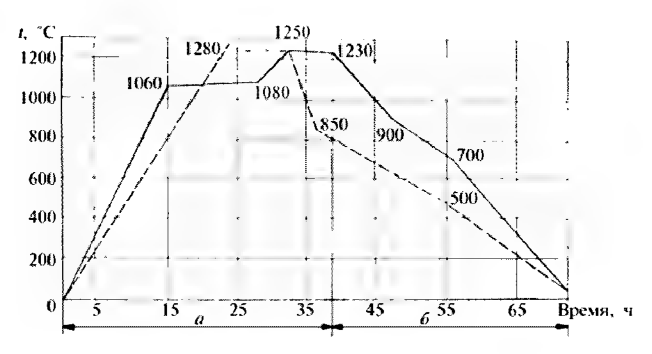


Рис. 3.60. Температурный режим обжига изделий из карбидов кремния (——) и электрокорунда (- - -)

Конструкция горелок должна обеспечивать также необходимый диапазон регулирования температуры продуктов горения в сторону и увеличения их количества для улучшения теплообмена внутри печи. В туннельных печах, как правило, регулирование режима производится автоматически [211].

В результате совместной работы ВНИИАШа, ВолжскВНИИАШа и специалистов завода "Ильич" был разработан и введен в эксплуатацию принципиально новый сушильно-печной агрегат, предназначенный для поточно-механизированной линии производства шлифовальных кругов на керамической связке диаметром 600 мм (рис. 3.61). Его отличительными особенностями по сравнению с существующими туннельными печами являются совмещение в одном агрегате сушила и печи, одноярусная садка абразивных заготовок, установка в зоне обжига дополнительных подсводовых горелок и увеличение ширины рабочего канала [212—215].

Техническая характеристика термического агрегата для сушки и обжига абразивного инструмента

Размеры рабочего канала, мм:	
Длина (сушило + туннельная печь)	97000
Ширина	2140
Высота по центру печи	600
Производительность, т/год	4800
Производительность вагонеток в смену	9
Средняя загрузка на одну вагонетку, т	1,06
Температура, °С:	
сушки	40—160
обжига	1240
Длительность циклов, ч:	
сушки	24
обжига	48
Топливо	Природный газ теплотворной способностью 34650 кДж/Нм^3
Расход топлива, Нм^3/ч	108
Габарит рабочей плоскости загрузки вагонетки, мм	2000 × 2000

Расчет теплового баланса сушильно-печного агрегата показывает, что в такой совмещенной конструкции 35 % теплоносителя из зоны охлаждения используется для сушки.

За период эксплуатации сушильно-печного агрегата установлено, что термический брак изделий, прошедших в нем термообработку, по сравнению с изделиями, обработанными в туннельной печи, в два раза ниже, а процент попадания в заданную твердость несколько выше (20 %).

При этом показано, что отклонение от заданной твердости изделий зависит главным образом от качества сырья и соблюдения технологии их формования. Одноярусная садка дает возможность полностью механизировать и автоматизировать тяжелую операцию установки кругов на вагонетки. Уменьшение высоты и увеличение ширины рабочего канала термоагрегата позволяют достичь оптимальных условий термообработки для обжига шлифовальных кругов большого диаметра.

Авторами [216] была спроектирована и введена в эксплуатацию на одном из отечественных заводов шестикамерная газовая печь, которая явилась ос-

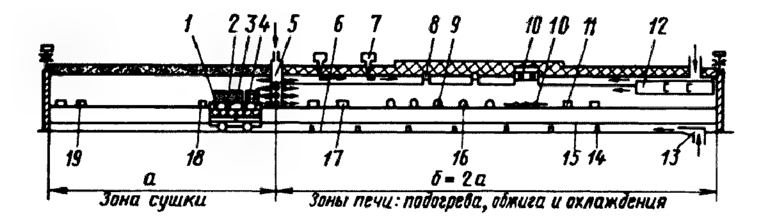


Рис. 3.61. Схема туннельной печи с одноярусной садкой и совмещенными сушкой и обжигом шлифовальных кругов:

1 — вагонетка туннельной печи; *2* — канализационная подина; *3* — карбид-кремниевые плиты с отверстиями; *4* — стопки шлифкругов; *5* — воздушная разделительная завеса; *6* — рельсовый путь; *7* — металлические воздушные короба-завесы; *8* — ряд горелок; *9* — второй ряд горелок; *10* — отверстия для подачи холодного воздуха; *11* — окна для отбора воздуха на дымосос; *12* — короба для подачи воздуха на охлаждение; *13* — короб для подачи воздуха на охлаждение металлоконструкций рам и колесных пар печных вагонеток; *14* — окна для отвода нагретого воздуха из подвагонеточного пространства; *15* — песочный затвор; *16* — топки для установки горелок *8* и *9*; *17* — окна в стенах зоны подогрева для отбора дымовых газов; *18* — окна для подачи нагретого воздуха в зону сушки; *19* — окна для вывода отработанного воздуха из зоны сушки в атмосферу

новным агрегатом поточно-механизированной линии производства кругов диаметром 100—200 мм на керамической связке. Особенностью такой печи является то, что каждый рабочий канал, по которому движется состав огнеупорных плит с изделиями, выполнен в виде муфеля, обогреваемого сверху и снизу продуктами сгорания природного газа. Каждый рабочий канал по высоте расположен между газовыми (огневыми) щелями, т. е. на шесть рабочих каналов приходится восемь газовых щелей. Смежные рабочие каналы, так же как и газовые, разделены между собой сплошной огнеупорной перегородкой толщиной 120 мм; в зоне обжига в перегородке выполнены окна для сообщения смежных газовых щелей между собой.

Техническая характеристика шестищелевой газовой печи

Размеры рабочего канала, мм	
Длина	10000
Ширина	400
Высота	180
Производительность, т/год	500
Температура обжига, °С	1230—1250
Полный цикл термической обработки, ч	25
В том числе:	
Нагрев	9,5
Обжиг	2,5
Охлаждение	13
Топливо	Природный газ
Расход топлива, Нм³/ч	29,9
Габаритные размеры карбид-кремниевых плит подвижного состава, мм	450 × 49,5 × 35

Эксплуатация шестикамерной печи показала, что скорость нагрева и охлаждения абразивных заготовок в печи ниже предельно допустимых в 1,5–2 раза и находится в пределах 60–200 °С/ч. Перепад температур в зоне выдержки не превышает 20 °С. Концентрация CO_2 в газовых щелях составляет 8,5–10,8 %, что соответствует коэффициенту избытка воздуха 1,1–1,35 %.

Удельный расход тепла многощелевых печей отечественного производства существенно ниже по сравнению с зарубежными и составляет 4404,5 кДж против характерных для чешских печей 8373,6 кДж и для печей Германии 9210,96 кДж.

Щелевые печи

В абразивной промышленности для обжига применяются как однощелевые, так и многощелевые печи в основном для термической обработки мелкозернистых, высокопористых заготовок диаметром до 500 мм, брусков, сегментов из различных абразивных материалов и их смесей.

Многощелевые печи являются несложными по конструкции и экономичными в работе. Кроме того, они могут работать в непрерывном цикле механизированных линий производства абразивного инструмента.

Основной рабочей частью однощелевой электрической печи (рис. 3.62) является длинный канал прямоугольной формы. В печи имеется два пода: неподвижный и скользящий по нему — подвижный. Неподвижный под выложен из самосвязанного карбид-кремниевого кирпича. Обжигаемый инструмент укладывают на карбид-кремниевые подкладные плиты, которые вплотную примыкают друг к другу и составляют в печи сплошной подвижный под.

Продвижение состава подкладных плит с инструментом осуществляется гидравлическим толкателем. Нагревательные элементы печи — селитовые стержни — расположены в подине и подсводовом пространстве рабочего канала (рис. 3.63).

Двухщелевые или трехщелевые электрические печи устроены подобно описанной выше, только они имеют несколько каналов, расположенных друг над другом (рис. 3.64). Например, трехщелевая печь [217] имеет неподвижные *7* и подвижные подины, составленные из подкладных плит *8*, на которые около печи укладываются заготовки обжигаемых абразивных изделий *9*. Нагревательные

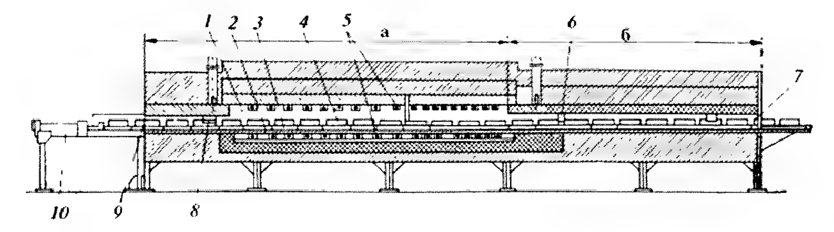


Рис. 3.62. Однощелевая электропечь:
а — зона нагрева и обжига; б — зона охлаждения; *1* — канал прямоугольной формы; *2* — неподвижный под; *3* — подвижный под; *4* — обжигаемый инструмент; *5* — подкладная плита; *6* — охлаждающие окна; *7* — окно выгрузки; *8* — окно для отбора отработанного воздуха; *9* — загрузочное окно; *10* — гидравлический толкатель

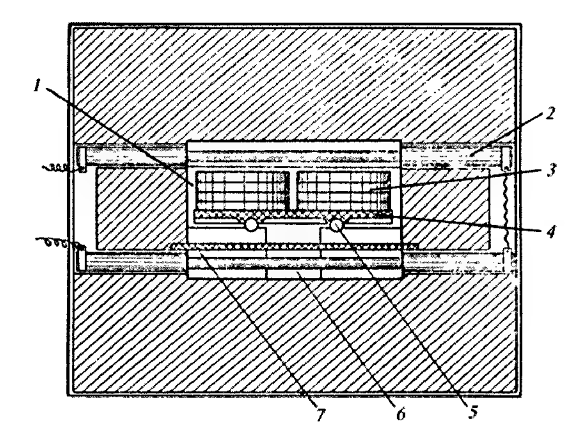


Рис. 3.63. Схема щелевой электрической туннельной печи (разрез по зоне обжига):

1 — канал печи; *2* — карбид-кремниевые нагревательные стержни; *3* — обжигаемые изделия; *4* — огнеупорная плита; *5* — направляющие для огнеупорных плит; *6* — подовый канал; *7* — защита нагревателей (подстержневой зонт)

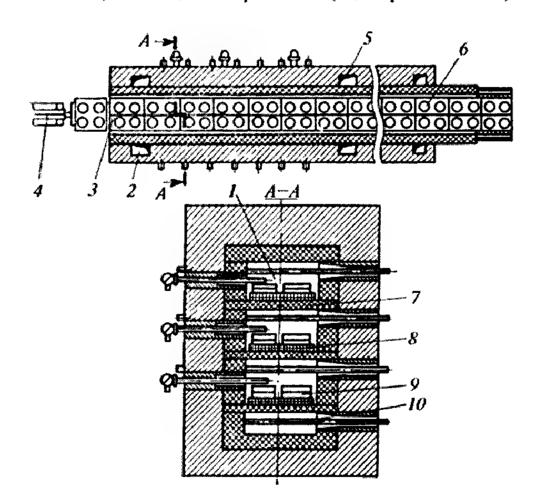


Рис. 3.64. Трехщелевая электропечь:

1 — канал печи; *2* — окно отбора отработанного воздуха из зоны подогрева; *3* — окно загрузки; *4* — гидравлические толкатели; *5* — окно отбора отработанного воздуха из зоны охлаждения; *6* — рабочий канал печи; *7* — неподвижная подина; *8* — подкладные плиты; *9* — обжигаемые изделия; *10* — нагревательные элементы

элементы *10* расположены в рабочем канале *6*. Отбор из печи (отработанного воздуха) производится через окна *2* зоны подогрева и через окна *5* зоны охлаждения. Продвижение состава подкладных плит в рабочих каналах *1* производится гидравлическим толкателем *4*, расположенным впереди окна загрузки *3*.

По длине рабочие каналы как однощелевой, так и трехщелевой электрических печей разбиты на тепловые зоны: зону нагрева, зону обжига и зону охлаждения, в каждой из которых обеспечивается заданная температура. Температурный режим зависит от длины печи и режима толкания. Примерный температурный режим обжига заготовок однокамерной щелевой печи при толкании 1 плита/ч представлен в табл. 3.30. Режим обжига контролируется при помощи термопар, показания которых, как правило, фиксируются в рабочих журналах.

Перед печью на подкладную плиту, установленную на рольганги, производится садка заготовок абразивного инструмента. Абразивные заготовки устанавливаются на плиты в соответствии с нормами технологического процесса, которые зависят от номенклатуры изделий и их характеристики (пример — табл. 3.31). Загрузка на плиту изделий также зависит от ассортимента изделий и колеблется от 15 до 40 кг.

Таблица 3.30

Температурный режим обжига заготовок (режим толкания, плита/мин — 60)

Наименование зоны печи	Номер термопары	Место установки термопар	Температура, °C
Начало зоны подогрева (НЕП)	1 2 3 4 5 6	Верх Середина Низ Верх Середина Низ	420±20 420±20 440±20 640±20 640±20 660±20
Конец зоны подогрева (КЗП)	7 8 9	Верх Середина Низ	850±20 850±20 850±20
Начало зоны выдержки (НЗВ)	10 11 12	Верх Середина Низ	1070±20 1070±20 1100±20
Конец зоны выдержки (КЗВ)	13 14 15	Верх Середина Низ	1260±10 1260±10 1270±10
Начало зоны охлаждения (КЗО)	16 17 18	Верх Середина Низ	1120±30 1140±30 1170±30
Конец зоны охлаждения (КЗО)	19 20 21 22 23 24	– – – – – –	600±50 600±50 600±50 400±50 200±30 100±30

Таблица 3.31

Нормы постановки заготовок кругов на обжиг

Материал	Характеристика заготовок				Способ постановки	Количество кругов в стопке
	Диаметр	Высота	Зернистость	Твердость		
25А; 95А; 63С; 64С; 53С; 54С; 14А	80–175	3–9	12–5	М1–ВТ	Верхними кругами	2–3
	80–175	3–9	4–М20	М1–ВТ		
	80–175	22–40	12–5	СМ1–С2	Стопкой	6–3
	80–175	22–40	12–5	СТ1–ВТ		1
	80–175	22–40	4–М20	СМ1–СТ1	Верхним кругом	1–2
		22–40	12–М20	М1–М3		1–2
		41–59	12–5	М1–С2	Стопкой	2–3
		41–59	4–М20	СТ1–ВТ, М1–ВТ	Верхним кругом	1
		60–80	12–М20	М1–ВТ	Верхним кругом	1
	200–350	6–12	12–5	М1–СТ3	В середину	4
	200–350	6–12	4–М50	М1–СМ2	Верхними кругами	1–2
	200–350	6–12	М40–М20	С1–СТ3		1–2
	200–350	6–12	12–4	М1–ВТ, Т1–ВТ		1–2
	200–350	13–20	12–5	М1–С2	Стопкой	1–5
	200–350	13–20	12–5	СТ1–ВТ		1–2
	200–350	21–40	12–5	СМ1–С2	Стопкой	3–5
	200–350	21–40	М40–М20	СМ1–С2	Верхними кругами	1–2
	200–350	21–40	12–М20	М1–М3, СТ1–ВТ		
	200–350	41–59	12–М20	М1–ВТ	Верхними кругами	1
	200–350	60–100	12–8	М1–ВТ	Стопкой	1–2
		–	6–20	–	Верхним кругом	1
	400–500	8–20	12–5	М1–С2, СТ1–СТ3	Верхними кругами	2–3
	400–500	8–20	4–М20	Т1–ВТ	Верхними кругами	1–2
	400–500	8–20	4–М20	М1–С2	В середину или верхним кругом	3
	400–500	21–40	12–5	М1–М3	В середину или нижним кругом	1–3
	400–500	21–40	12–5	СМ1–С2	Нижними кругами	1–2
	400–500	21–40	12–5	СТ1–ВТ	Верхним кругом	
	400–500	21–40	4–М20	М1–ВТ		
	400–500	41–59	12–5	М1–С2	Нижним кругом	1
	400–500	41–59	4–М20	М1–ВТ	Верхним кругом	1
	400–500	60–100	12–5	М1–С2	Нижним кругом	1
	400–500	60–100	4–М28	М1–ВТ	По 1 шт. на плиту	1

Примечания: 1. Заготовки кругов диаметром 100–175 мм ставятся в обставку.
2. Заготовки с отверстием диаметром 32 мм твердостью СТ1 и выше ставятся только верхними кругами, заготовки с отверстием диаметром 75 мм, зернистостью 12–5 и твердостью до СТ1 разрешается ставить стопкой. 3. Средняя загрузка кругов на плиту 27 кг.

Далее подкладную плиту с заготовками перемещают к загрузочному отверстию печи и с помощью толкателя плавно заталкивают в печь, продвигая вперед весь состав подкладных плит с изделиями. На выходе из печи подкладная плита выталкивается на поперечный рольганг. Инструмент снимается с плиты, а плита заталкивается на этажерку возврата, которая по монорельсу периодически перемещается от конца к началу печи. Гидравлические и механические толкатели, применяемые для перемещения состава подкладных плит с обжигаемым инструментом в печах, имеют толкающее усилие до $5 \cdot 10^5$ Н и скорость рабочего хода 2—5 м/ч.

Печи периодического действия

Печи периодического действия, обеспечивающие температуру обжига до 1350 °С, занимают небольшую долю в объеме количества печей, используемых в абразивной промышленности. Для достижения температуры 1300—1350 °С в этих печах в качестве топлива применяется природный газ. К достоинству периодических печей относится возможность обжигать изделия по определенному температурному режиму, а к недостатку — высокий удельный расход топлива [159].

Конструкция периодических печей различна, например электрические муфельные печи, камерные колпаковые печи (рис. 3.65), газовые периодические печи с выкатным подом (рис. 3.66).

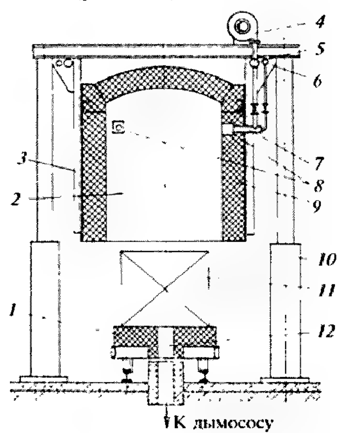


Рис. 3.65. Камерная колпаковая печь (колпак поднят вверх):

1 — выдвижная подина; *2* — подъемный колпак; *3* — металлоконструкция; *4* — вентилятор; *5* — трубопровод подачи воздуха к горелкам; *6* — газопровод; *7* — горелки; *8* — топки; *9* — футеровка; *10* — гидравлический подъемник; *11* — обжигаемые изделия; *12* — отверстия для отбора отработанных дымовых газов

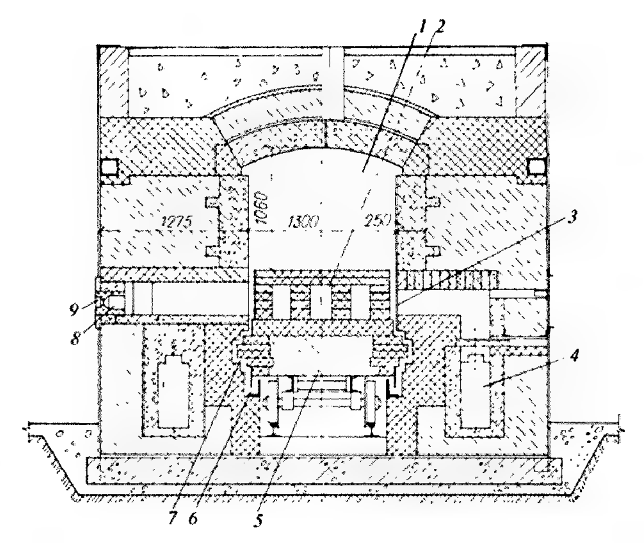


Рис. 3.66. Печь периодического действия с выкатным подом:

1 — рабочая камера; *2* — выкатной под; *3* — окно отбора дымовых газов; *4* — сборные каналы; *5* — вагонетка печи; *6* — песочный затвор; *7* — лабиринтное устройство; *8* — топка; *9* — горелка

В настоящее время в ООО "Модис НОТ" (Россия) изготавливаются электрические камерные печи с объемом рабочей камеры 0,5 и 3,0 м², с одним или двумя выдвижными подами. Загрузка-разгрузка изделий производится вне печи. При работе с двумя выдвижными подами один находится в печи, другой — на загрузке-разгрузке, что позволяет сократить время простоя электропечи. Равномерность нагрева садки обеспечивается расположением нагревателей на двери, всех стенках и подине печи. Управление производится с пульта.

Технические характеристики электрических камерных печей

Максимальная рабочая температура, °С	1350; 1350
Точность поддержания температуры, °С	±10; ±10
Потребляемая мощность, кВт	75; 130
Объем рабочей камеры, м³	0,5; 3,0
Максимальная садка изделий, кг	120; 800
Размеры рабочего пространства, мм	
Длина	1600; 2500
Ширина	600; 1200
Высота	600; 1000
Габаритные размеры печи, мм	
Длина	2300; 10000
Длина футерованной части	4000; 4000
Ширина	1600; 2500
Высота	1900; 2400
Масса, кг	1500; 6000

Многощелевыми газовыми печами в отличие от электрических являются печи муфельного типа, в которых рабочие каналы чередуются с огневыми каналами. Сжигание природного газа и отбор дымовых газов производятся в огневом канале, изолированном от рабочего канала карбид-кремниевыми плитами, что позволяет создать окислительную среду в рабочем канале. Рабочий канал вентилируется воздухом, подсасываемым в конце печи. Воздух движется навстречу изделиям через все зоны печи, и с ним удаляются продукты химических реакций материала изделий с газами через заборные окна [218].

Таблица 3.32

Техническая характеристика печей для обжига заготовок шлифовальных кругов на керамической связке

Наименование печи	Модель	Техническая характеристика печи			
		Ширина рабочего канала, м	Длина печи, м	Диаметр обжигаемых кругов, мм	Производительность, т/год
Туннельная пламенная					
с многоярусной садкой	ПТП-1,4-100	1,4	100	До 1100	15000
с одноярусной садкой	ПТПО-2,1-100	2,1	100	До 600	5000
Электрическая однощелевая	П1ЩЭ-0,6-16	0,6	16	До 500	100
Электрическая трехщелевая	П3ЩЭ-0,4-10	0,4	10	До 250	250
Газовая шестищелевая	ПХЩЭ-0,6-16	0,6	16	До 500	300
Камерная колпаковая с полезной садкой 10 т	П6ЩГ-0,4-10	0,4	10	До 250	500
	ПК-10	2,1	5	До 1000	500

Характеристика туннельных и щелевых печей в абразивной отрасли представлена в табл. 3.32.

Контроль операций обжига и охлаждения

Проведение контроля процессов обжига и охлаждения вызывается необходимостью правильно выполнять заданные режимы в целях получения качественных изделий. Контроль режима обжига сводится в основном к контролю температуры, состава газовой среды и давления в печи; при охлаждении контролируется только температура.

Контроль температуры обжига осуществляется чаще всего при помощи платинородиевых термопар и оптических пирометров, а также стандартных керамических пироскопов. Охлаждение печи контролируется только термопарами.

Термопары устанавливаются в различных зонах печи в зависимости от ее системы (конструкции). В туннельной печи они устанавливаются в нескольких точках зон подогрева, обжига и охлаждения, как в верхней части (над сводом), так и внизу; в печах периодического действия — вверху и на высоте 0,7–0,8 м от пода в нескольких диаметрально противоположных точках.

В случаях когда тепло передается не только конвекцией газов, но и лучеиспусканием, могут применяться оптические пирометры. Применение их возможно при измерении высоких температур, начиная с температуры около 700 °С.

Газовая среда в печах контролируется путем проведения анализа состава газов при помощи ручных и автоматических газоанализаторов; при этом определяется в процентах по объему содержание CO_2 и сумма объемов $CO_2 + O_2$, а также $CO_2 + O_2 + CO$.

При контроле газовой среды забор газа из печного пространства обычно производят на высоте около 0,5 м от пода и в подсводовом пространстве печи. Трубка для забора газа должна быть погружена в исследуемую среду возможно глубже — на 100–250 мм от стенки печи.

Измерение давления в печи при обжиге изделий производится при помощи приборов (U-образный манометр, тягометр с наклонной трубкой и др.).

3.4.2.3. Техника безопасности при обжиге абразивных изделий

Одним из важных вопросов техники безопасности и производственной санитарии в термических цехах является вопрос эксплуатации газопроводов и газового оборудования.

К обслуживанию печей, при отоплении их газом, допускаются лица, сдавшие техминимум по газовому делу квалификационной комиссии с участием представителей Госгортехнадзора РФ. Проверка знаний техминимума производится ежегодно.

Первоначальная подача газа или подача газа после длительной остановки печей (более семи суток) производится ответственным за газовое хозяйство лицом с разрешения и в присутствии представителя региональной конторы по газовому хозяйству и всего обслуживающего персонала.

Монтажно-демонтажные работы на действующем газопроводе разрешаются только с ведома региональной конторы города после отключения ремонтируемого участка металлической заглушкой и продувки его инертным газом в присутствии представителя конторы.

Выполнение ремонта у действующей газовой топки печи разрешается под непосредственным наблюдением ответственного за газовое хозяйство цеха лица и при условии, исключающем возможность повреждения газопровода.

Работы по ремонту отопления, водопровода, электросети в цехе должны быть согласованы с ответственным за газовое хозяйство завода и при условии отсутствия запаха газа в цехе.

Работающие должны быть проинструктированы по вопросам безопасности работ с применением газа. Так, например, если давление газа в газопроводе упало до нуля, необходимо немедленно закрыть главный вентиль и отключить печь.

Одно из обязательных защитных средств, предохраняющих глаза при обслуживании печей, — темные очки (синие, дымчатые стекла).

При эксплуатации газопроводов необходимо тщательно наблюдать за герметичностью аппаратуры и арматуры, через которые газ может проникнуть в помещение. При наличии утечек газа включение и выключение рубильников, зажигание спичек, курение и т. п. запрещается. Места утечек газа обнаруживаются только с помощью мыльного раствора. Применение огня для этой цели воспрещается.

Не разрешается нагрузка газопровода всякого рода тяжестями или использование его в качестве опорных конструкций. Продувка газопровода через

топочные камеры запрещается. Категорически запрещается оставлять работающие агрегаты без надзора со стороны обслуживающего персонала.

При выполнении газоопасных работ следует: применять только взрывобезопасное освещение; пользоваться шланговыми противогазами или аппаратами КИП; применять инструмент омедненный, из цветных металлов или обильно смазанный тавотом.

При замерзании газопровода отогревать его открытым огнем не разрешается. При остановке на срок свыше семи суток газопровод должен быть освобожден от газа и заглушен металлической заглушкой на вводе.

Газопроводы после отключений, превышающих по длительности семь суток, проверяются на плотность путем смачивания у всех мест соединения мыльной водой, а после сезонных перерывов испытываются воздухом на плотность по нормам действующих ТУ.

При отравлении газом необходимо: вывести или вынести пострадавшего на свежий воздух; оказать пострадавшему первую помощь; вызвать "скорую помощь".

При авариях и несчастных случаях, связанных с газом, следует немедленно поставить в известность аварийную газовую службу, управление Госгортехнадзора РФ с последующим письменным уведомлением.

Об авариях, происшедших в вечернее и ночное время, управление Госгортехнадзора оповещается на следующий день не позднее 10 ч. Посторонним лицам вход в газоснабжающее помещение категорически воспрещается.

В термических цехах, оборудованных камерными печами периодического действия, должны быть предусмотрены условия быстрого удаления мощных тепловых потоков от остывающих печей, если это тепло не утилизируется соответствующим образом.

Люки печей, находящиеся в полу, должны быть ограждены перилами высотой около 1 м или закрыты прочной частой решеткой, чтобы предотвратить падение людей в люк. Нагруженные кругами и изделиями вагонетки туннельных печей не должны выходить за определенный габарит, соответствующий сечению туннеля печи, во избежание падения изделий при закатывании вагонетки в печь.

Очистка подовых каналов и боровов в камерных периодических печах должна быть механизированной; в случае же ручной очистки ее не следует производить при температуре выше 60 °С.

Укладка обожженных кругов в колонку на полу допускается по высоте не более 1,5 м.

Транспортные устройства (тележки и пр.), предназначенные для перевозки кругов, должны иметь борты со всех сторон для предохранения от разваливания кругов.

3.5. Поточно-механизированные линии производства абразивных изделий

В 1979—1980 годы были созданы первые поточно-механизированные линии производства шлифовальных кругов на керамической связке, начиная с приготовления смесей, дозирования и формования и кончая термической обработкой в щелевых или туннельных печах. Применение таких линий позволило устранить тяжелый ручной труд, снизить трудоемкость и высвободить 30—40 % рабочих.

Механизированные линии производства кругов диаметрами 125–150 и 600 мм на керамической связке

Механизированные линии состоят из трех комплексов: смесеприготовительного, формовочного и термического, которые объединены в единую, последовательно работающую цепь механизмов и машин, обеспечивающих выполнение технологических операций от приготовления формовочной смеси до термической обработки изделий и отличаются одна от другой технологией изготовления кругов малого и большого диаметров, конструкциями печных агрегатов и аппаратурным оформлением технологического процесса производства.

Механизированная линия производства кругов диаметром 125–150 мм на керамической связке

Линия состоит из трех комплексов: смесеприготовительного, формовочного и термического, которые соединены в единую, последовательно работающую цепь механизмов и машин, обеспечивающих выполнение операций от приготовления формовочной смеси до термообработки.

В смесеприготовительном комплексе предусмотрены две системы бункеров, каждая из которых состоит из одного бункера зерна, трех бункеров связки (для трех марок связки) и бункера декстрина. К течкам бункеров связки и декстрина подвешены на пружинах электровибропитатели модели С912А, обеспечивающие регулирование подачи компонентов в дозаторы. Для каждой системы предусмотрены: дозаторы зерна, связки, декстрина, жидкого стекла, воды; механизированная течка; смесительная машина; рыхлительная машина; скиповый подъемник.

Бункер-дозатор закреплен на платформе рычажных циферблатных весов модели РП-150ц13Т. Материал поступает самотеком через течку бункера, снабженную секторным затвором. По окончании взвешивания производится автоматическая разгрузка бункера-дозатора, и цикл повторяется. Исполнительными механизмами являются два пневмоцилиндра.

Дозирование исходных материалов производится в следующем порядке: зерно + жидкое стекло + связка + декстрин; в таком же порядке дозированные материалы поступают в смесительную машину. Связующим звеном между дозаторами и смесительной машиной является механизированная течка, которая подается к смесительной машине к началу загрузки компонентов и находится над ней до окончания загрузки. Через нее в машину поступают сыпучие материалы: зерно, связка, декстрин, а вода и жидкое стекло подаются непосредственно через отверстие в крышке смесительной машины по трубопроводу. Смешивание начинается в момент подачи первого компонента. По окончании загрузки течка убирается при помощи пневмоцилиндра, и смешивание продолжается.

Рыхлительная машина, установленная в линии, разрушает комки смеси, и под сетку уходит однородный по крупности материал, поступающий в скиповый подъемник, который перегружает разрыхленную смесь в кюбель, подвешенный к тележке, с помощью которой производится раздача смеси по формовочным агрегатам.

Выгрузка подготовленной смеси из кюбеля производится по сигналу с формовочного агрегата, после чего кюбель с перегрузочной тележкой возвращается в исходное положение (под лоток скипового подъемника). Взаимодействие всех механизмов формовочного комплекса и их последовательность в работе осуществляются в соответствии с цикловой диаграммой. Из кюбеля смесь подается в бункер питателя, далее вращающимся диском питателя перемещается в рабочую камеру задувной головки формовочного агрегата, и идет процесс формования круга.

Вытолкнутый круг снимается вакуум-съемником и укладывается на огнеупорную плиту, установленную с помощью толкателя магазина плит на механизм укладки кругов. Заформованный круг вакуум-съемником снимается с агрегата и укладывается на огнеупорную плиту, установленную на механизм укладки кругов в стопки. Каждый уложенный ряд кругов пересыпается кварцевым песком с помощью соответствующего механизма. Плита с кругами подается толкателем на подъемный стол и далее на один из ярусов трехъярусного конвейера. Из двух рядов стоящих рядом трехъярусных конвейеров одновременно шесть плит с кругами подаются в перегрузочную этажерку, которая после загрузки перемещается к печи. С помощью толкателей плиты с кругами подаются в печь для термической обработки. Обожженные круги очищаются от кварцевого песка и укладываются на поддоны в стопки. Очищенные плиты укладываются в стопки и с помощью тележки подаются к магазину плит.

Укладка кругов на плиту производится по установленной программе в зависимости от диаметра круга. Круги диаметром 125 мм укладываются в девять стопок, а круги диаметром 150 мм — в четыре стопки. При укладке вакуум-съемником двух или трех кругов (зависит от диаметра круга) механизм укладки подает плиту вперед на один шаг. Затем укладываются еще два или три круга и в зависимости от их диаметра механизм укладки перемещается на плиту еще на один шаг вперед или возвращает ее обратно на исходную позицию для укладки второго слоя кругов. При возвращении в исходное положение огнеупорной плиты с уложенными в один слой кругами включается механизм пересыпки кругов. После нанесения пересыпки на круги цикл повторяется. Когда стопка кругов достигнет 100—110 мм, толкатель магазина плит перемещает плиту со стопками кругов на подъемный стол, установленный непосредственно у трехъярусного конвейера. С помощью толкателя плита со стопками кругов подается в нижний ярус конвейера, затем в средний и верхний ярусы. После этого цикл повторяется. После заполнения плитами всех трех ярусов конвейера формовочный агрегат отключается. Запас плит со стопками кругов, находящихся на всех ярусах конвейера, обеспечивает трехсуточную бесперебойную работу шестиканальной газовой печи.

Термическая обработка абразивного инструмента производится в шестиканальной газовой печи. Особенностью конструкции печи является то, что каждый рабочий канал, по которому движется состав огнеупорных плит с изделиями, выполнен в виде муфеля, обогреваемого сверху и снизу продуктами сгорания природного газа. Каждый рабочий канал по высоте расположен между газовыми (огневыми) щелями, т. е. на шесть рабочих каналов приходится восемь газовых щелей. Смежные рабочие каналы, так же как и газовые, разделены между собой сплошной огнеупорной перегородкой толщиной 120 мм;

в зоне обжига в перегородке выполнены окна для сообщения смежных газовых щелей между собой.

Под рабочего канала выложен плитами из карбида кремния, свободно уложенными на корундовые заплечики боковой стенки и средней перегородки.

Свод рабочего канала также выложен плитами из карбида кремния. Кладка газовой печи выполнена внутри цельнометаллического каркаса.

В качестве подвижного состава в каждом из шести рабочих каналов применены карбид-кремниевые плиты размером 450 × 425 × 35 мм, на которых обжигаемые изделия последовательно проходят зоны подогрева, обжига и охлаждения. В зоне обжига установлены 42 газовые горелки, по 21 с обеих сторон печи. На каждую газовую щель, кроме нижних, приходится по пять горелок, а на каждую нижнюю щель — по шесть горелок. Дымовые газы из печи удаляются через систему "боровов" и трубопроводов за счет разрежения, создаваемого дымовой трубой.

Рабочие каналы печи имеют уклон 1 : 100 в сторону выгрузки. Конец зоны охлаждения печи выполнен в виде цельнометаллического тамбура, в котором в качестве пода рабочего канала использованы рольганги.

Подача плит с изделиями к печи производится загрузочной этажеркой челночного типа, которая может принимать плиты с любого из четырех конвейеров. В тот момент, когда одна половина этажерки будет находиться против печи под загрузкой, вторая ее половина будет стоять против двух конвейеров под загрузкой, и наоборот. Сталкивание плит с этажерки производится гидравлическими цилиндрами. Продвижение состава плит вдоль печи в каждых двух смежных рабочих каналах проходит одновременно. В конце печи установлена опускная этажерка из шести каналов, на которую заходят плиты с обожженными изделиями. Этажерка по команде с кнопочного пульта опускается до уровня, удобного для ручной разгрузки изделий с плит и самих плит на специальные поддоны.

Техническая характеристика механизированной линии производства кругов диаметром 125–150 мм на керамической связке

Производительность, кг/ч	150
Размеры кругов, мм	
Наружный диаметр	125–150
Высота	32–51
Диаметр отверстия	6–50
Режим работы, смены	
Смесеприготовительный участок	2
Формовочный участок	2
Термический участок	Круглосуточно
Численность рабочих, обслуживающих линию в смену, чел.	
Смесеприготовительный участок	1
Формовочный участок	2
Термический участок	1
Мощность электродвигателей, кВт	106
Габаритные размеры (длина × ширина), м	60 × 6

На рис. 3.67 представлена схема устройства для упрочнения сырца шлифовальных кругов методом продува углекислым газом, совмещенного с пневмосъемником [219].

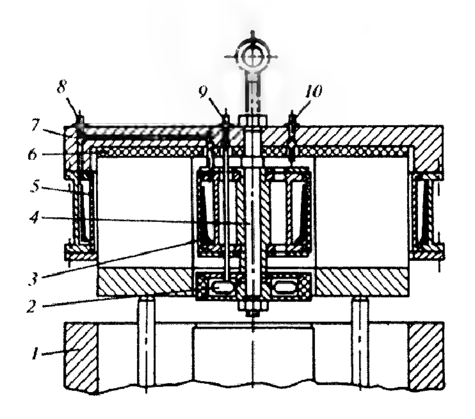


Рис. 3.67. Схема устройства для упрочнения сырца шлифовальных кругов методом продувки углекислым газом:
1 — пресс-форма; *2* — пневмозатвор; *3* — внутренний пневмозахват; *4* — несущий винт; *5* — наружный пневмохзахват; *6* — уплотнение из высокопористой резины; *7* — верхняя плита; *8* — штуцер для подачи сжатого воздуха к внутреннему и наружному пневмозахватам; *9* — штуцер для подачи сжатого воздуха к пневмозатвору; *10* — штуцер для подачи углекислоты

Устройство работает следующим образом. После выталкивания круга из пресс-формы *1* сверху на него опускается устройство для продувки, пневмозатвор *2* занимает положение на уровне отверстия нижней формовочной плиты; через штуцер *9* в камеру пневмозатвора подается сжатый воздух, и отверстие нижней формовочной плиты плотно перекрывается. В отверстие круга через штуцер *10* под давлением вводится углекислота и осуществляется цикл продувки (пневмозатвор можно фиксировать на любом расстоянии от верхней плоскости круга, что позволяет использовать установку для пропитки углекислотой кругов любой высоты). Углекислый газ, поступающий под давлением 0,0490–0,1960 МПа в замкнутый объем отверстия круга, равномерно просачивается в радиальных направлениях к его периферии. По окончании процесса продувки отключается подача углекислоты, перекрывается подвод сжатого воздуха в пневмозатвор, и в камеры наружного и внутреннего пневмозатворов подается сжатый воздух, а упрочненный круг пневмосъемником переносится с позиции выталкивания на толкающий транспортер и устанавливается на одну из движущихся кареток. Перемещение кареток на установленный шаг производится гидроцилиндром через храповой механизм. При этом пневмосъемник, установленный на перекладчике с правой стороны пресса, укладывает круги на нечетные каретки, а пневмосъемник, установленный на перекладчике с левой стороны пресса, укладывает круги на четные каретки. Вместе с кареткой круг перемещается на позицию укладки на печную вагонетку. При движе-

нии автоматически специальным устройством на круг наносится огнеупорная крошка. Возврат просыпавшейся крошки в бункер устройства осуществляется виброподъемником. Круг с нанесенной на него огнеупорной крошкой пневмосъемником, закрепленным на координатном укладчике, укладывается на печную вагонетку в стопку высотой до 300 мм.

При достижении высоты 300 мм координатный укладчик ставит круги в следующую по ходу движения стопку. По окончании заполнения ряда стопками кругов подается команда и вагонетка специальным механизмом перемещается на один шаг вперед. Цикл укладки кругов повторяется. Заполненная вагонетка перегрузочной тележкой подается к туннельной печи с одноярусной садкой [215] для термической обработки.

Механизированная линия производства кругов диаметром 600 мм на керамической связке

Линия приготовления формовочных смесей. Поточная линия приготовления формовочной смеси включает в себя лопастной смеситель, разгрузка которого осуществляется поворотом чаши. При разгрузке формовочная смесь высыпается из чаши смесителя в специальный ковш, который является частью подъемно-поворотного механизма. Ковш с механизмом устанавливается над разрыхлительной машиной. Разгрузка ковша в рыхлительную машину производится через дно либо специальное дозирующее устройство.

Рыхлая смесь после машины собирается в специальные кюбели, при помощи которых транспортируется к формовочным агрегатам. Управление линией осуществляется оператором от единого пульта управления. Линия может работать как в наладочном, так и в полуавтоматическом режиме.

Формование абразивного инструмента. Формовочная смесь подается к формовочному агрегату транспортной тележкой в установленном на ней кюбеле, из которого скиповым подъемником передается в приемный бункер весового дозатора. После взвешивания доза формовочной смеси поступает в разравнивающую машину, с помощью которой осуществляется укладка смеси в пресс-форму. Затем тележка с пресс-формой перемещается на позицию прессования. При достижении определенной плотности смеси в пресс-форме прессование заканчивается, и тележка по рельсовому пути транспортируется на позицию выталкивания. Одновременно пневмосъемник (колокольного типа) устанавливается над позицией выталкивания, и круг, вытолкнутый из пресс-формы с помощью гидровыталкивателя, входит во внутреннюю полость пневмосъемника до упора колокола в нижнюю формовочную плиту. В колокол пневмосъемника подается углекислый газ, предназначенный для упрочнения сырого круга.

Обжиг абразивных кругов. Туннельная печь для совмещенной сушки и обжига абразивных кругов включает: туннельное сушило с аппаратурой для автоматического поддержания температурного и аэродинамического режимов; туннельную печь, отапливаемую природным газом; механизацию ввода и вывода вагонеток; механический толкатель для передвижения вагонеток в туннельной печи; вентиляционные установки.

Туннельная печь с одноярусной садкой [214, 215] представляет собой длинный горизонтальный туннель, по которому перемещается состав вагонеток

с загруженными в стопки кругами. В передней части туннельной печи располагается сушило, которое отделено от туннельной печи воздушной завесой. При движении вагонетки по каналу печи последовательно проходят стадии сушки, обжига и охлаждения. Состав вагонеток в печи передвигается с помощью толкателя. Съем стопок шлифовальных кругов с вагонеток производится с помощью специального перекладчика. Затем стопка кругов перемещается на стол установки для разборки стопок, и с помощью гидроцилиндра производится сталкивание верхнего круга относительно нижних кругов, и так повторяется до полного разбора стопки. Очищенные от огнеупорной крошки круги отправляются на механическую обработку.

3.6. Механическая обработка абразивных изделий

В целях обеспечения требований ГОСТ 2424–83 по точности формы и геометрических размеров, внешнему виду абразивных изделий, а также требований по неуравновешенности по ГОСТ 3060–75 абразивные изделия подвергаются механической обработке.

Механическая обработка абразивных изделий может производиться частично после сушки (вытачивание профиля) и после обжига. В отечественной практике механическая обработка производится после обжига в следующей последовательности: сначала обрабатываются плоскости, а затем отверстия, периферия и фасонные поверхности абразивных изделий.

Обработка плоских поверхностей (торцев) абразивных кругов производится на плоскообдирочных станках моделей КШ-32 (диаметр обрабатываемых кругов 100–300 мм), КШ-62 (диаметр кругов 350–500 мм высотой до 80 мм), КШ-64 (диаметр 300–600 мм высотой 6–200 мм), КШ-122 (диаметр кругов 500–1100 мм), чугунной дробью (ДЧК по ГОСТ 11964–81Е), прошедшей рассев на грохоте с определенным размером ячеек. Шлифовальные круги диаметром менее 300 мм обрабатываются дробью крупностью 0,9–1,2 мм, а круги диаметром 400 мм и более — крупностью 1,2–1,6 мм [220].

При обработке чугунным зерном разрушение хрупкого керамического тела абразивного круга происходит вследствие действия значительных местных сжимающих сил и появления в результате этого трещин в поверхностном слое с последующим его разрушением до обеспечения заданной геометрии круга (рис. 3.68). Материал снимается как путем раскалывания отдельных зерен, так и вырыва их из связки.

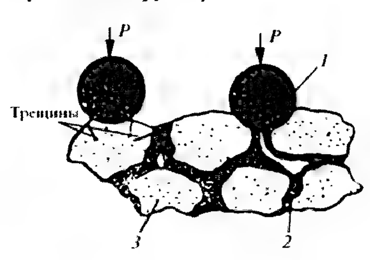


Рис. 3.68. Схема обработки абразивных кругов чугунным зерном:
1 – чугунное зерно; *2* – связка; *3* – абразивное зерно

Схема обработки торцевых плоскостей на плоскообдирочном станке представлена на рис. 3.69. Согласно этой схеме для обработки круг *1* устанавливают необработанной поверхностью на вращающееся полотно стола *2* и прижимают к нему вращающейся планшайбой (см. рис. 3.69). Полотно вращается с частотой

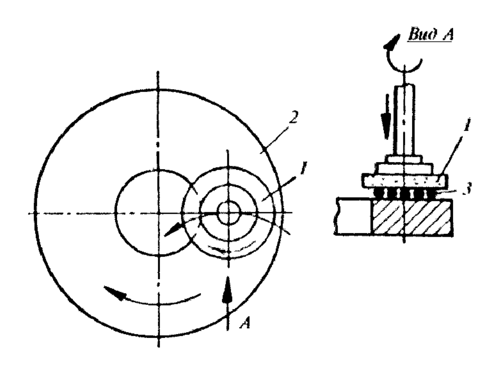


Рис. 3.69. Схема обработки торцов на плоскообдирочном станке:
1 обрабатываемый круг; 2 полотно станка; 3 чугунное зерно

примерно 20 об/мин, и на поверхность его непрерывно элеватором подсыпается чугунное зерно 3. После обработки одной стороны круга его переворачивают и операцию повторяют на другой его стороне. Отработанное зерно скатывается с полотна и поднимается элеватором в бункер, откуда непрерывно по лоткам подается снова на плоскость полотна. Для обеспечения равномерного износа чугунной шайбы диаметр обрабатываемого круга должен быть больше диаметра шайбы. Поэтому при обработке изделий малого диаметра их загружают по несколько штук в обойму. Высоту обрабатываемого круга контролируют по индикатору.

При обработке мягких, пористых и тонких шлифовальных кругов применяются прокладки из губчатой резины толщиной не менее 10 мм, которые используются только при обработке одной стороны круга. При этом уменьшается давление пневмоприжима планшайбы, что снижает производительность станка.

Давление пневмоприжима шпинделя станка при обработке заготовок высотой 6—16 мм, зернистостью 25—16 и твердостью СМ1—СТ3 составляет не более 0,010—0,015 МПа, а высотой 16—20 мм, тех же зернистости и твердости — 0,015—0,20 МПа. В целях получения допуска по высоте кругов класса АА (0,2—0,6 мм) авторы [221] предложили производить механическую обработку шлифовальных кругов с разделением съема припуска на число рабочих шпинделей станка. Например, припуск на одну сторону круга, равный 2,0 мм, снимается последовательно каждым из четырех шпинделей по 0,5 мм. Транспортировка кругов с позиции на позицию производится столом станка. После обработки одного торца круга для всех партий станок переводится в режим обработки второго торца в аналогичной последовательности.

Обработка шлифовальных кругов зернистостью 6 и мельче, а также круги класса АА вначале проходят предварительную обработку на станках моделей КШ-32, КШ-62, КШ-64 (рис. 3.70), а затем отправляются на чистовую обработку

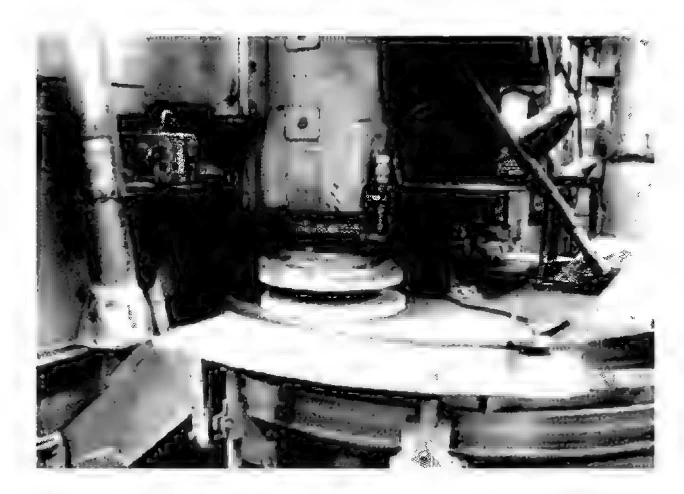


Рис. 3.70. Общий вид плоскообдирочного станка модели КШ-64

(припуск по высоте кругов на чистовую обработку не менее 1,5–2 мм). Чистовая обработка производится на станках, например, моделей 3Е-576, 3Д-756 сборной торцешлифовальной головкой типа АПС-2, оснащенной алмазными брусками 125 × 14 × 30 × 3 А630/500 М50 или алмазными вставками [222, 223]. В качестве охлаждающей и удаляющей продукты обработки жидкости используется вода. Обрабатываемые заготовки устанавливаются на магнитном столе станка, укрепляются бандажом стола и стальными плитками диаметром не менее 70 мм (рис. 3.71). Для исключения появления на заготовках темных полос поверхность стола должна быть покрыта диэлектрическим материалом толщиной 1,0–1,5 мм. После чистовой обработки торцевых плоскостей кругов производится сушка изделий в камерном сушиле при подъеме температуры до 180 °С в течение 18 ч. Охлаждение изделий производится вместе с сушилом.



Рис. 3.71. Обработка мелкозернистых кругов на станке 3Е-576

Кроме того, для обработки плоскостей кругов используются обычные плоскошлифовальные или токарные станки; в первом случае плоскости кругов обрабатываются шлифовальными кругами, а во втором — стальными конусами или шлифовальными кругами [224]. Схема обработки кругов конусом представлена на рис. 3.72. При обработке конусом происходит обкатка со скольжением (проскальзывание — до 10 %), и конус постепенно изнашивается. Конусный резец, изготовленный из инструментальной стали марок У8–У10 и закаленный до высокой твердости, имеет бо́льшую режущую поверхность, следовательно, более износосто-

ек и обеспечивает высокую точность обработки. Режимы резания при обработке стальными конусами: окружная скорость изделия — 10—12 м/с, скорость перемещения суппорта — 0,2—2,5 м/мин, глубина резания — 0,2—0,5 мм. Торцы кругов обтачивают от периферии к центру, не доходя до отверстия на 5—10 мм, а оставшиеся 5—10 мм обрабатывают от центра к периферии. Такой порядок обработки обеспечивает отсутствие сколов. После обработки круг зачищается сегментом на бакелитовой связке.

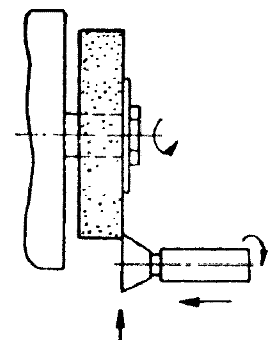


Рис. 3.72. Схема обработки наружной поверхности кругов прямого профиля на токарном станке

Обработка конусом применяется также для образования выточек на кругах, например, формы ПВ [224].

Обработка отверстий. Отверстия малого диаметра растачиваются на металлообрабатывающих станках, например на сверлильном станке модели 21, специальными сверлами с применением чугунного, стального или абразивного зерна. Схема обработки отверстия в круге приведена на рис. 3.73. При обработке отверстий в кругах малой высоты круги предварительно собирают в пакеты (стопки), подбирая соответственно длину сверла. Круги с отверстием диаметром 75 мм и более обрабатывают на токарных станках стальными конусами либо шарошками (рис. 3.74).

Обработку отверстий заготовок с диаметром посадочного отверстия от 20 до 127 мм и наружным диаметром 100—300 мм производят без охлаждающей жидкости на станках модели 3К228, диаметром посадочного отверстия 76—305 мм и наружного диаметра 350—500 мм — на станках модели 3К229. В качестве режущего инструмента на этих станках выступают алмазные круги зернистостью 800/630 на металлической связке.

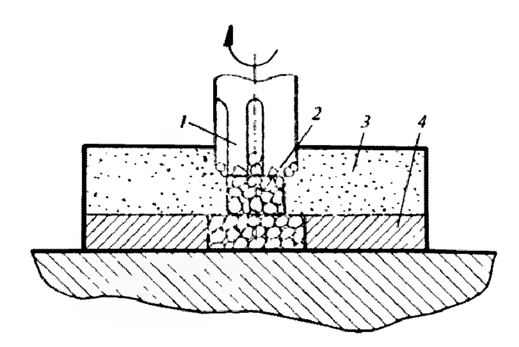


Рис. 3.73. Схема обработки посадочного отверстия круга с использованием чугунного зерна:

1 — обрабатываемый круг; *2* — сверло; *3* — чугунное зерно; *4* — подкладка

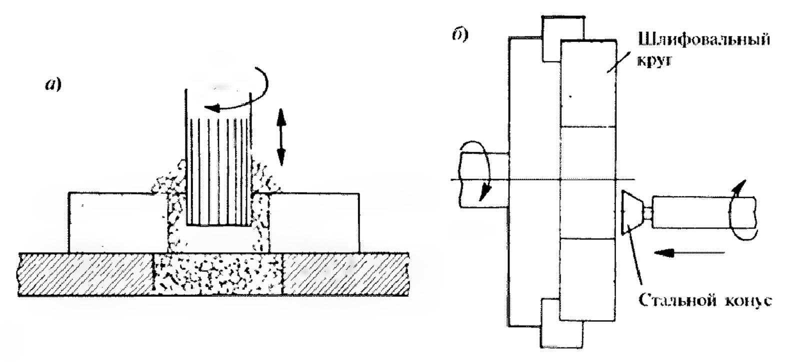


Рис. 3.74. Схема обработки отверстия в круге на сверлильном станке специальным сверлом, чугунным, стальным или абразивным зерном (*а*) и на токарных станках стальными конусами (*б*)

Кроме того, на одном из абразивных заводов была разработана технология обработки отверстий диаметром 32—127 мм (наружный диаметр кругов — до 400 мм) методом шлифования алмазными роликами на горячепрессованной связке МКВ-10 на станках модели СВШИ, обеспечивающих сменную производительность до 1000 кругов при их высоком качестве [225].

Обработку отверстий заготовок с диаметром посадочного отверстия диаметром 203—305 мм производят на станках моделей РТ-102 (диаметр кругов 500 мм, рис. 3.75), РТ-103 (диаметр кругов 600—1100 мм, рис. 3.76) инструментом

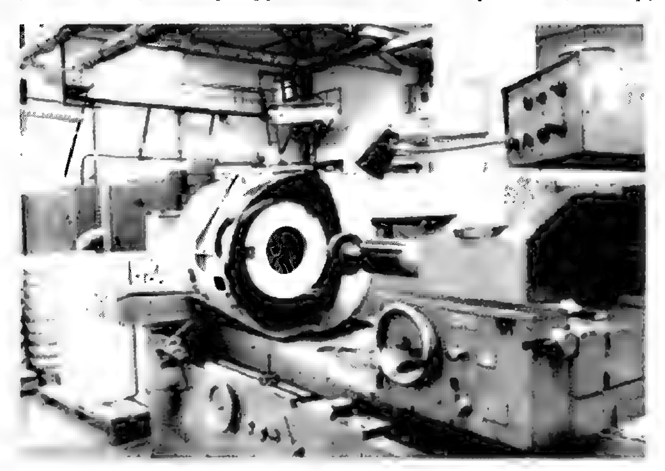


Рис. 3.75. Общий вид токарно-лобового станка модели РТ-102 для обработки кругов диаметром до 500 мм

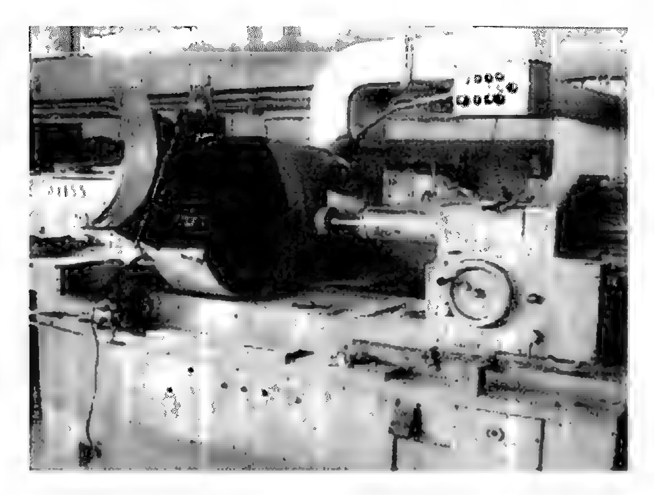


Рис. 3.76. Общий вид токарно-лобового станка модели РТ-103

из карбида кремния зернистостью 80—125, твердостью С1—С2 на бакелитовой и керамической связках [226]. Обработка отверстий абразивных заготовок высотой от 6 до 25 мм производится с использованием пакета толщиной 50—55 мм, от 26 до 40 мм — по две заготовки в пакете, а от 41 мм и более — по одной заготовке. Заготовки с диаметром посадочного отверстия, полученным в процессе расточки с бо́льшим предельным отклонением, калибруются перед обработкой периферии круга вручную специальной калибровочной массой различного состава [227]. Круги класса АА не калибруются.

Техническая характеристика станков моделей РТ-102 и РТ-103 приведена в табл. 3.33.

Обеспечение точности обработки посадочных отверстий диаметрами $32^{+0,1}$, $203^{+0,2}$ и $305^{+0,3}$ мм, как это определено стандартом для кругов класса АА,

Таблица 3.33

Техническая характеристика станков моделей РТ

Техническая характеристика	Модель станка	
	РТ-102	РТ-103
Размеры обрабатываемых кругов, мм		
Наружный диаметр	350–500	600–1100
Высота	6–200	10–200
Диаметр отверстия	75; 127; 203; 305	203; 305
Масса обрабатываемых кругов, кг	80	180
Частота вращения шпинделя, об/мин	400; 600; 900	160; 200; 320; 400
Размеры инструментального круга, мм	200 × 40 × 75	250 × 40 × 75
Габаритные размеры станка (длина × ширина × высота), мм	3535 × 2540 × 2270	4160 × 3100 × 2540
Масса станка, кг	5000	11000

является достаточно сложной задачей. Высокий коэффициент трения металла по абразиву усложняет и центрирование кругов в трехкулачковом патроне, и контроль получаемого размера. В связи с этим посадочные отверстия кругов диаметром 20–76 мм по классам А и АА обрабатывают на внутришлифовальных или специальных станках методом шлифования с применением алмазного инструмента.

Шлифовальные круги диаметром 250–1060 мм с посадочными отверстиями диаметром 127–305 мм рекомендуется обрабатывать на модернизированных станках моделей РТ-102 и РТ-103. Станки обеспечивают совмещенную обработку пакета кругов высотой 200 мм и более; одновременно обрабатывается посадочное отверстие алмазным инструментом и поверхность наружного диаметра круга обдирочными шлифовальными кругами [228].

При выборе базы для совмещенной обработки пакета кругов были проведены статистические исследования точности геометрической формы поверхности наружного диаметра и посадочного отверстия. Оценка по коэффициенту вибрации и полю рассеивания ω показывает, что центрирование пакета заготовок необходимо проводить по периферии круга, посадочное отверстие в результате термической обработки имеет большую степень усадки и деформации.

Разделение припуска при алмазной обработке посадочного отверстия и поверхности наружного диаметра на число рабочих шпинделей также является прогрессивным направлением в технологии обработки шлифовальных кругов.

Имеется два направления в формировании точного посадочного отверстия шлифовальных кругов: обработка алмазным инструментом и заливка втулки (калибровка).

Преимущество алмазной обработки состоит в более высокой производительности и возможности полной автоматизации процесса, недостаток — высокая себестоимость обработки, относительное значение которой возрастает с увеличением диаметра посадочного отверстия.

Важным практическим вопросом является обработка с подачей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или всухую. Обработка с охлаждением сокращает расход алмазного инструмента. Особенно значительно влияет охлаждение на производительность при механической обработке твердых кругов.

Однако при обработке с СОЖ шлифовальный инструмент накапливает в порах значительное (до 20 мас. %) количество влаги, которая мешает выполнению дальнейших технологических и контрольных операций. Поэтому при удовлетворительной вытяжной системе цеховой вентиляции для крупнозернистых шлифовальных кругов твердостью до СТ3 допустима механическая обработка всухую. При обработке с СОЖ необходима последующая сушка кругов.

Обработка периферии. Обработка периферии абразивного инструмента диаметром до 300 мм производится на станках модели КТ-80А (рис. 3.77) кругами из карбида кремния на бакелитовой связке, а инструмента диаметром 350–1100 мм — на токарно-лобовых станках моделей РТ-102 и РТ-103 (рис. 3.78) кругами из карбида кремния зернистостью 80–125, твердостью С1–С2 на бакелитовой и керамической связках. Высота обрабатываемого пакета кругов — 300 мм.

Кроме того, для обработки периферии круга применяется вертикально-шлифовальный станок модели КС-115. Он предназначен для обработки стопки абразивных кругов, расположенной вертикально, при помощи обрабатывающего шлифовального круга диаметром 200–250 мм или конуса.

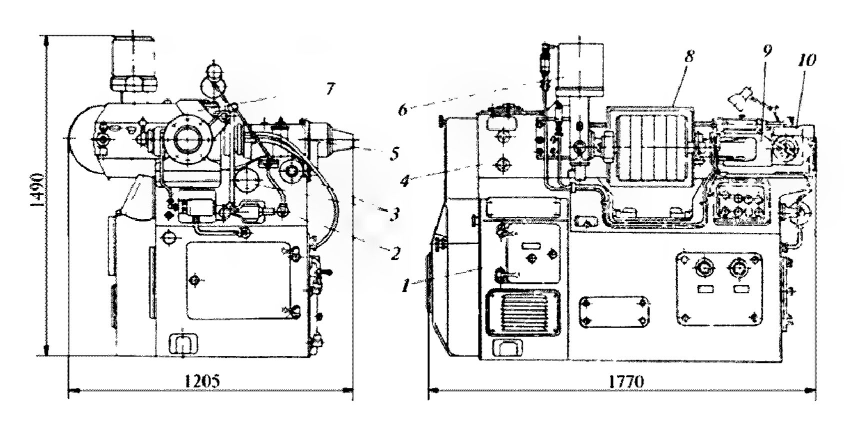


Рис. 3.77. Станок модели КТ-80А:

1 — станина; *2* — суппорт; *3* — круглые направляющие; *4* — шпиндель; *5* — прижимной пневмоцилиндр; *6* — пневмоцилиндр поворота загрузочного барабана; *7* — загрузочный механизм; *8* — защитный кожух; *9* — корпус задней бабки; *10* — пневмоцилиндр перемещения пиноли

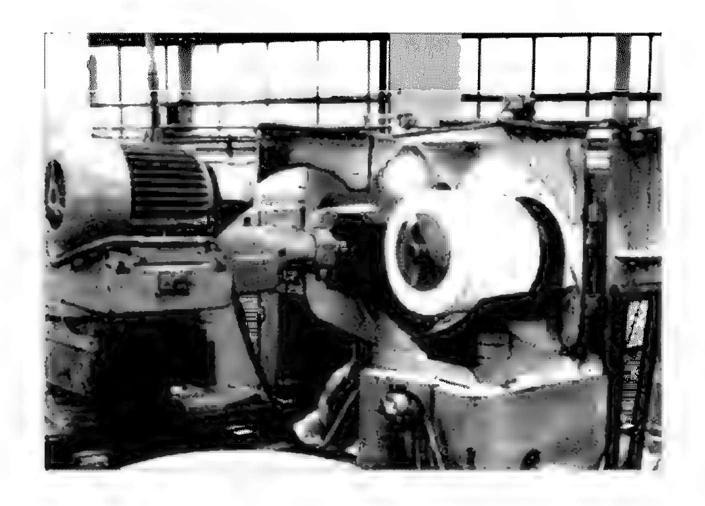


Рис. 3.78. Общий вид токарно-лобового станка модели РТ-102 для обработки периферии круга

Для удовлетворения потребности промышленности в шлифовальных кругах классов А и АА первого и второго классов по неуравновешенности, а также в целях повышения производительности Волжским филиалом ВНИИАШа разработан способ обработки посадочного отверстия и наружной поверхности пакета заготовок шлифовальных кругов одновременно с одной установки на специальном модернизированном станке модели РТ-103. В этом случае предварительно собранный пакет заготовок кругов зажимается по торцам, а посадочные отверстия и наружные диаметры оказываются доступными для совмещенной обработки. Центрирование пакета заготовок при этом осуществляется по его наружной поверхности. Целесообразность центрирования по наружной поверхности установлена на основании статистических исследований отклонений размеров посадочных отверстий и наружных поверхностей заготовок для шлифовальных кругов с номинальными наружными диаметрами 750 и 900 мм [228].

На рис. 3.79 показана схема модернизированного станка модели РТ-103.

Для центрирования пакета заготовок шлифовальных кругов на станке установлен механизм центрирования (на схеме не показан).

Обработка производится следующим образом: заготовки шлифовальных кругов с помощью гидроподъемника поднимаются до уровня высоты станины

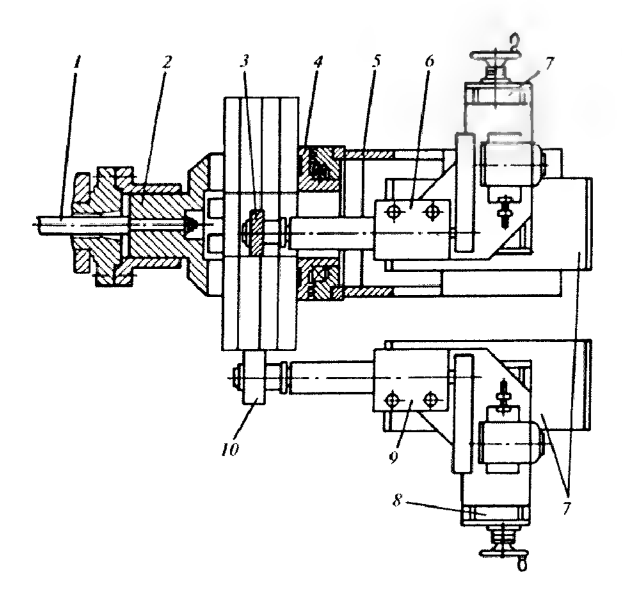


Рис. 3.79. Схема станка модели РТ-103 после модернизации (вид сверху):

1 — шток; *2* — планшайба; *3* — алмазная фреза модели ФАЦ-175; *4* — подшипниковая опора; *5* — неподвижная стойка; *6* — шлифовальная головка; *7* — суппорт; *8* — дополнительная каретка; *9* — шлифовальная головка; *10* — инструментальный шлифовальный круг

и перекатываются в зазор между подшипниковой опорой и планшайбой, образуя пакет высотой 220—240 мм, включается механизм центрирования, и пакет кругов автоматически центрируется относительно оси шпинделя станка. С пульта управления подается команда на зажим пакета, после чего механизм центрирования отводится в исходное положение. Включаются электродвигатели вращения шпинделя станка и шлифовальных головок, затем гидроцилиндры кареток возвратно-поступательного движения, и посредством маховичков суппортов сообщается поперечная подача шлифовальным головкам.

Таким образом, одновременно обрабатываются поверхности посадочного отверстия и наружные поверхности. По окончании обработки каретка со шлифовальными головками отводится в крайнее заднее положение, включаются электродвигатели шпинделя и шлифовальных головок, контролируются размеры посадочного отверстия и наружной поверхности, механизм центрирования поднимается вверх под пакет заготовок, пакет разжимается и опускается на призму механизма, затем перекатывается на подъемник и отправляется на следующую операцию. Цикл повторяется.

Результаты эксплуатации такого станка показывают, что производительность увеличивается в 1,5—2 раза, а точность по смещению оси отверстия от номинального расположения гарантирует 100 %-ное получение кругов класса АА.

Обработка фасонных поверхностей. Обработка фасонного профиля производится на нестандартных станках, разработанных абразивными заводами (типа ЭЛ, Д, Ж и др.), обработка однозаходных "червяков" производится на токарно-винторезном станке ДИП-300 с использованием в качестве инструмента конусных резцов, алмазных кругов и кругов на органической и керамической связках.

Обработка фасонных абразивных кругов формы ПВ, С, 2Т, 3Т, 3П и 4П, диаметром от 100 до 300 мм производится также на станке модели КТ-41. Вид обработанных кругов фасонного профиля представлен на рис. 3.80. Круги на керамической связке из карбида кремния обрабатываются стальными конусами или абразивными кругами на бакелитовой связке зернистостью 40, твердостью С2—СТ1. В табл. 3.34 дана технологическая сводная карта механической обработки шлифовальных кругов.

Обдувка. После полной механической обработки заготовки на деревянных поддонах подаются автопогрузчиком к специальной обдувочной камере для их очистки от пыли. Обдувка производится при открытых шиберах вентиляции сжатым воздухом, который подводится по гибкому шлангу с металлическим наконечником. Заготовки в камере ставятся ребром на резиновые коврики. Обдувается каждая заготовка. Категорически запрещается обдувать круги вне обдувочной камеры. Расход сжатого воздуха при давлении 7 атм составляет 250—350 л/мин.

Волжским филиалом ВНИИАШа была разработана машина модели ВН-80 (рис. 3.81) для обдувки кругов диаметром 150—450 мм всех высот [229]. Машина состоит из сварной рамы *1*, к которой крепятся все основные узлы. В средней части рамы установлена герметичная камера *4*, внутри которой размещено несколько приводных резиновых роликов, осуществляющих транспортировку обдуваемых кругов внутри камеры. На входе и выходе герметичной камеры установлены по две подвесные шторки (дверцы) *3*, служащие для уплотнения камеры в момент обдувки и транспортировки.



Рис. 3.80. Обработанные круги фасонного профиля

Процесс обдувки непрерывный. Производительность машины — около 400 кругов в час. Машина обслуживается двумя рабочими. Неочищенные круги укладываются вручную на приводные ролики. По выходе из камеры очищенные круги маркируются и укладываются на поддоны, которые транспортируются автопогрузчиком на участок контроля качества изделий.

3.7. Виды и причины брака абразивных изделий

Главное условие изготовления качественного абразивного инструмента — точное исполнение всех операций технологического процесса, нарушение заданного параметра производства инструмента приводит к образованию различных видов брака.

Многообразие причин, вызывающих тот или иной брак инструмента, создает определенные трудности в установлении истинной причины и виновника брака, которые усугубляются тем, что на каждом абразивном предприятии один и тот же вид брака и его причины классифицируются по-разному.

М.Г. Эфросом, П.А. Гавриловым разработана инструкция по "классификации брака абразивного инструмента на керамической связке" (как наиболее бракоемкой продукции, брак которой достигает 3–8 %). В табл. 3.35 представлены основные виды брака, а также технологические операции, на которых допускаются нарушения технологического процесса.

При производстве абразивного инструмента примерно две трети брака являются результатом трещин, возникающих в основном в процессе термической обработки [230]. Процесс трещинообразования недоступен непосредственному наблюдению, что препятствует достаточно точному определению температурных условий, состояния черепка и стадии термической обработки, на которой появляются трещины как результат несоблюдения установленных режимов

Таблица 3.34

Технологическая сводная карта механической обработки абразивных кругов зернистостями 50–8 на керамических связках

Типоразмер и характеристика обрабатываемого инструмента	Вид обработки	Тип оборудования	Инструмент	Припуск, мм	Режимы обработки				Обеспечиваемый допуск
					Частота вращения заготовки, об/мин	Частота вращения инструмента, об/мин	Подача поперечная	Подача продольная	
1 100-300 × 10-80 × 20-127 25А12-40 K5M1–Т2	Плоскообдирочная (обработка торцевой поверхности)	Плоскообдирочный станок модели КШ-32. Диаметр рабочего полотна 1200 мм	Дробь чугунная колотая (ГОСТ 11964-81Е)	2–3	26,6	16,0 (вращение полотна стола)	–	–	±0,6...±1,2
	Торцешлифовальная (обработка торцевой поверхности с повышенной точностью и улучшенной шероховатостью поверхности)	Плоскошлифовальный станок с круглым магнитным вращающимся столом модели 3D 756. Диаметр стола 1000 мм	Алмазная планшайба сборная типа АПС-2С 1250/1000 К100, М50 или СВК 800/630 ТУ 2-037-284–81)	0,6–0,8 0,6–0,8	29,0	975	0,03–1,5 мм/об	–	±0,2...±0,25
	Обработка посадочного отверстия с повышенной точностью	Внутришлифовальный станок модели 3К228 (максимальный диаметр отверстия 200 мм)	Круг алмазный 1A1D-16 (ГОСТ 16167–80); 1А1, Д = = 30–70 (ТУ 2-037-283–81)	0,4–0,6	600	12000	0,61–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,1...±0,2
	Обработка наружной поверхности	Обдирочно-шлифовальный станок модели КТ-260. Обработка кругов в пакете. Длина пакета 320 мм	Круг шлифовальный ПВ 250 × 100 × 76 (ГОСТ 2464–83)	2,0–3,0	250	2480	0,05–0,3 мм/двойной ход		±2,0...±4,0

Типоразмер и характеристика обрабатываемого инструмента	Вид обработки	Тип оборудования	Инструмент	Припуск, мм	Режимы обработки				Обеспечиваемый допуск
					Частота вращения заготовки, об/мин	Частота вращения инструмента, об/мин	Подача поперечная	Подача продольная	
1 350–500 × 10–80 × 76–305 25 А12–40 К5 М1–Т2	Плоскообдирочная (обработка торцевой поверхности)	Плоскообдирочный станок модели КШ-62. Диаметр рабочего полотна 2300 мм	Дробь чугунная колотая (ГОСТ 11964-81Е)	2,0–4,0	17,0	11,5–19,3 (вращение полотна станка)	–	–	±0,6...±1,2
	Торцешлифовальная	Плоскошлифовальный станок с круглым вращающимся магнитным столом модели 3Е756. Диаметр стола 1000 мм	Алмазная планшайба сборного типа АПС-2С 1250/1000, К100 М50 или СВК 800/630 (ТУ 2-037-284–81)	1,5–2,0	290	975	0,03–1,5 мм/мм	–	±0,2...±0,25
	Обработка посадочного отверстия с повышенной точностью	Внутришлифовальный станок модели 3К229	Алмазный круг 1А1, Д = 16 (ГОСТ 16167–80). Алмазный круг 1А1, Д = = 30–70 (ТУ 2-037-283–81)	0,5–1,0	600	12000	0,01–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,2...±0,3
		Токарно-лобовой станок РТ-102. Максимальный диаметр изделия 500 мм	Фреза алмазная ФАЦ-110 или ФАЦ-175 (ТУ 2-037-446–84)	0,8–1,5	500	2900–6000	0,05–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,2...±0,3

Продолжение табл. 3.34

1 350–500 × 10–80 × 76–305 25 A12–40 K5 M1–T2	Обработка наружной поверхности или одновременная обработка посадочного отверстия и наружной поверхности	Токарно-лобовой станок РТ-102	Круг шлифовальный 1 250 × 63 × 76 (ТУ 2-036-735–84)	2,5–4,0	500	1500	0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±4,0
		Токарно-лобовой станок модели РТ-102 (модернизированный). Обработка кругов в пакете длиной 360 мм, зажим пакета заготовок гидравлический по торцевым поверхностям	Для обработки посадочного отверстия алмазный круг 1A1, Д = 70 мм (ТУ 2-037-283–81) или фреза ФАЦ-110, ФАЦ-115 (ТУ 2-037-446–84)	0,8–1,5	500	2900–4500	0,05–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,2...±0,3
			Для обработки наружной поверхности шлифовальными кругами 1 250 × 63 × 76 (2 шт.) (ТУ 2-036-735–84)	2,5–4,0		15000	0,3 мм/двойной ход	–	±4,0
1 500-650 × × 100-250 × × 203-305 25 A12–40 M1–T2	Плоско-обдирочная (обработка торцевой поверхности)	Плоско-обдирочный станок модели КШ-122. Диаметр рабочего полотна 2300 мм	Дробь чугунная колотая (ГОСТ 11964–81Е)	3,0–4,0	13,5	11,5–19,3 (вращение полотна стола)	–	–	±2,0

Продолжение табл. 3.34

Типоразмер и характеристика обрабатываемого инструмента	Вид обработки	Тип оборудования	Инструмент	Припуск, мм	Режимы обработки				Обеспечиваемый допуск
					Частота вращения заготовки, об/мин	Частота вращения инструмента, об/мин	Подача поперечная	Подача продольная	
1 500-650 × × 100-250 × × 203-305 A12-40 M1 – T2	Плоскообдирочная обработка торцевой повехности	Плоскообдирочный станок модели КШ-122. Диаметр рабочего полотна 2300 мм	Дробь чугунная колотая (ГОСТ 11964-81Е)	3,0–4,0	13,5	11,5–19,3 (вращение полотна стола)	–	–	±2,0
	Торцешлифовальная (обработка торцевой поверхности с повышенной точностью и улучшенной шероховатостью поверхности)	Плоскошлифовальный станок с круглым вращающимся магнитным столом диаметром 1000 мм, модель 3Е756	Алмазная планшайба сборная типа АПС-2С 1250/1000 К100 М50 или СВК 800/630 (ТУ 2-037-287–81)	1,5–2,0	29	975	0,03–1,5 мм/мин	2,0–4,0	±0,3
	Одновременная обработка посадочного отверстия и наружной поверхности	Токарно-лобовой станок модели РТ-103 (модернизированный). Обработка кругов в пакете длиной 1 240 мм. Зажим заготовок по торцевым поверхностям	Для обработки отверстия фреза алмазная ФАЦ-175(ТУ 2-037-446–84)	3,0–4,0	242	2900	0,03–1,5 мм/двойной ход	2,0–4,0	+0,2...±0,3
			Для обработки наружной поверхности шлифовальными кругами (2 шт.) 1 250 × 63 × 76 (ТУ 2 –036-735–84)	3,0–5,0	242	1500	0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±5,0

Продолжение табл. 3.34

1 600–1000 × × 20–125 × × 203–305 25 A12–40 M1–T2	Плоскообдирочная (обработка торцевой поверхности)	Плоскообдирочный станок модели КШ-122	Дробь чугунная колотая (ГОСТ 11964-81Е)	5,0–8,0	13,5	11,5–19,3 (вращение полотна стола)	–	–	±1,2...±2,0
1 600–100 × × 20–125 × × 203–305 25 A12–40 M1–T2	Торцешлифовальная (обработка торцевой поверхности с повышенной точностью и улучшенной шероховатостью поверхности)	Плоскошлифовальный станок с круглым магнитным вращающимся столом. Диаметр стола 1000 мм, модель 3Е756	Алмазная планшайба сборная типа АПС-2С 1250/1000 К100 М50 или СВК 800/630 (ТУ 2-037-284–81)	2,0–4,0	29,0	975	0,3–1,5 мм/мин	–	±0,2...±0,3
	Одновременная обработка посадочного отверстия и наружной поверхности круга	Токарно-лобовой станок модели РТ-103 (модернизированный). Обработка пакета кругов длиной 240 мм с зажимом по торцевым поверхностям	Обработка отверстия алмазиой фрезой ФАЦ-175; обработка наружной поверхности кругом шлифовальным (2 шт.) 1250 × 63 × 76	2,5–3,5	242	2900	0,03–1,5 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,2...±0,3
						1500	0,3 мм/двойной ход	–	±5,0...±6,0
ЧЦ, ЧК 80 175 × 40–63 × 13–32 A16-40 M1–T2	Торцешлифовальная (обработка торцевой поверхности)	Плоскошлифовальный станок модели 3Е754 с круглым магнитным вращающимся столом. Диаметр стола 1000 мм	Алмазная планшайба АПС-2С 1250/1000 К100,М50 или СВК-800 630 (ТУ 2-037-284–81)	2,0–3,0	29	975	0,03–1,5	–	±0,2...±0,25

Окончание табл. 3.34

Типоразмер и характеристика обрабатываемого инструмента	Вид обработки	Тип оборудования	Инструмент	Припуск, мм	Режимы обработки				Обеспечиваемый допуск
					Частота вращения заготовки, об/мин	Частота вращения инструмента, об/мин	Подача поперечная	Подача продольная	
ЧЦ, ЧК 80–175 × × 40–63 × × 13–32 А16–40 М1–Т2	Обработка посадочного отверстия	Внутришлифовальный станок модели 3К 228В. Максимальный диаметр отверстия 200 мм	Алмазный круг. Диаметр 10 мм (ГОСТ 16168–80) и 25 мм (ГОСТ 16167–80)	0,3–0,6	140	9000–22000	0,01–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	+0,1
	Обработка внутренней поверхности	Для кругов ЧЦ внутришлифовальный станок 3К228, 3К227, для ЧК – токарно-винторезный станок 1А616 (модернизированный)	Алмазные круги 1А1. Диаметр кругов 30 и 70 мм (ТУ 2-037-283–81)	1,5–2,0	140	9000	0,05–0,3 мм/двойной ход	2,0–4,0	±0,2
				1,5–2,0	100	8000		2,0–4,0	
	Обработка наружной поверхности	Для кругов ЧЦ внутришлифовальный станок 3К228, 3К227, для ЧК токарно-винторезный 1А616 (модернизированный)	Алмазный круг 1А1. Диаметр 70 мм (ТУ 2-037-283–81)	1,5–2,0	140	9000	0,05–0,30 мм/двойной ход	2,0–4,0	±1,2
				1,5–2,0	100	8000		2,0–4,0	±1,2

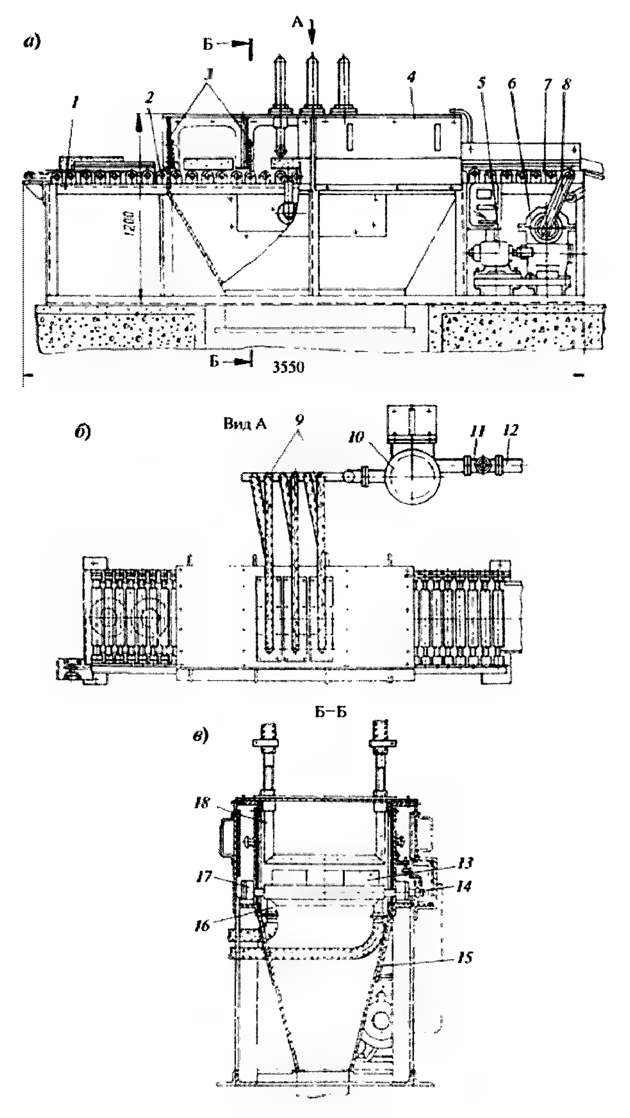


Рис. 3.81. Машина ВН-80 для обдувки шлифовальных кругов:

а — общий вид; *б* — вид сверху; *в* — разрез Б–Б; *1* — рама сварная; *2* — обрезиненные приводные ролики; *3* — подвесные шторки; *4* — камера; *5* — электродвигатель; *6* — редуктор; *7, 8* — роликовые цепи; *9* — шланги; *10* — влагоотделитель; *11* — воздушный кран; *12* — воздушная сеть; *13* — шлифовальный круг; *14* — звездочка; *15* — воронка; *16, 18* — обдувочные трубки; *17* — корпуса подшипников

Таблица 3.35

Основные виды брака и его причины

Вид и особенности брака	Шифр брака	Причины брака	Операция технологического процесса
Включение массы другого цвета (чистого зерна, наличие пятен другого цвета на поверхности абразивного круга, включение смеси другой зернистости)	01	Не выдержано технологическое время смешивания Плохо зачищена мешалка, бункер или емкость, в которой хранится абразивная смесь Применение некачественной подсыпки на печных вагонах	Смешивание " Обжиг
Раковины	02	Применение загрязненного зерна и непросеянного декстрина: загрузка декстрина на влажное зерно; нарушение режима смешивания	Смешивание
Трещины в круге:	03	Увеличенное или уменьшенное количество увлажнителя Использование рабочей или сушильной плиты с прогибом больше допустимой нормы Нарушение режимов сушки (повышенная или пониженная температура сушки, сокращение или увеличение скорости сушки) Плохая постановка кругов на плиты и вагоны Нарушение режима термообработки в момент подогрева (завышение температуры, нарушение режима толкания вагонеток), повышенная скорость охлаждения, увеличенная выдержка в зонах нагрева и охлаждения Нарушение режимов механической обработки (повышенное давление планшайбы, отсутствие прокладок) Небрежная транспортировка сырых заготовок	Смешивание Формование Сушка Обжиг Механическая обработка Транспортировка
Инородные включения ("мушка"): мелкие расплывчатые темного цвета, равномерно распределенные в теле круга; мелкие размером с зерно, из которого изготовлен круг; крупные кремового цвета; мелкие расплывчатые светло-рыжего цвета	04	Применение засоренных материалов (зерна, засоренные железистыми включениями, и связки с повышенным содержанием железа) Не зачищены приемный бункер, мешалка или разравнивающая машина Работа на неотцентрированной мешалке (в смеси – металлическая стружка с "рубашки") Применение подсыпки, засоренной железистыми включениями	Смешивание " " Обжиг

Продолжение табл. 3.35

Трещины периферические: трещина на периферии короткая, часто сопровождающаяся трещиной у отверстия круга, на плоскости 5–10 мм и далее идет по периферии на всю высоту круга, на периферии с одной стороны – на всю высоту круга, на плоскости – переходящая на периферию, глубокая, рваная; мелкие трещины по кромкам круга, образующиеся при его механической обработке:	05	Нарушение режима смешивания формовочной смеси и нарушение количества увлажнителя в смеси Установка стопок абразивных кругов вплотную друг к другу на сушильной плите Нарушение режима сушки абразивных кругов Нарушение режима формования кругов (использование изношенного кольца пресс-формы, перекос при выталкивании круга из пресс-формы) Нарушение режима обжига (установка круга на крупную подсыпку, нарушение температурного режима) Транспортировка заготовок, нарушение режима механической обработки кругов (повышенное давление планшайбы, отсутствие прокладок)	Смешивание Формование Сушка Формование Обжиг Транспортировка
Расслоение (трещина) на периферии и внутри по отверстию круга, на плоскости у отверстия или у периферии, по длине окружности (полная или участок) и др.	06	Увеличенное или уменьшенное количество увлажнителя Износ оправки кольца; крепление пресс-формы с перекосом и плохая ее центровка; увеличенная скорость плунжера при формовании кругов диаметром 500–600 мм и высотой 110–250 мм, перекос на кулачках после снятия давления; перекос плиты на пальцах выталкивателя Перепрессовка (превышение допустимого давления), прессование на подкладках разной высоты	Смешивание Техническое обслуживание Формование
Трещины радиальные (плоскостные): на плоскости от отверстия круга до периферии круга, на плоскости радиальные, не доходящие до отверстия и периферии:	07	Нарушение рецепта приготовления формовочной смеси Укладка свежезаформованных кругов на деформированные сушильные плиты Перенос свежезаформованных кругов без подкладных плит Укладка кругов в стопки с превышением нормы Недосушка кругов Неисправность оборудования и оснастки Излом кругов при транспортировке или при постановке в обжиг Нарушение режима термообработки	Смешивание Формование Сушка " Техническое обслуживание Транспортировка Обжиг

Вид и особенности брака	Шифр брака	Причины брака	Операция технологического процесса
Трещины в круге плоскостные (диаметральные): волосяные от периферии по диаметру (такой круг при его простукивании часто распадается пополам); трещины S-образной формы	08	Нарушение температурного режима в зоне охлаждения Нарушение режима механической обработки плоскостей (повышенное давление планшайбы, отсутствие прокладок, перекос планшайбы, износ полотна плоскообдирочного станка)	Обжиг Механическая обработка
Трещины концентрические: концентрические на плоскости, расположенные примерно посредине круга и на торцевой поверхности	09	Нарушение режима выдержки кругов перед сушкой; нарушение режима сушки (постановка кругов по 2 шт. в стопку) Неисправность оборудования и оснастки	Сушка Техническое обслуживание
Зауглероженность круга (темные пятна на поверхности или в изломе круга). Вспученность Черные пятна на кругах из карбида кремния Вспученность на кругах из карбида кремния	11	Завышенное содержание декстрина в круге Нарушение режима постановки кругов на обжиг Недостаточная вентиляция в печи (нарушение состава газовой среды в печи)	Смешивание Обжиг "
Неравномерная твердость (разность показаний в две и более степени на поверхности круга)	13	Некачественное смешивание формовочной смеси Неравномерная укладка формовочной смеси в пресс-форму Перекос на заготовке при ее формовании Нарушение карт постановки заготовок на печной вагон, изменение высоты стопок Нарушение режима термообработки	Смешивание Формование " Обжиг "

Продолжение табл. 3.35

Деформация (изогнутость поверхности круга, иногда наличие трещин различного вида)	40	Нарушение рецепта приготовления формовочной смеси Нарушение режима формования и установки круга на сушильный вагон Постановка кругов в обжиг на плохо притертый нижний круг Постановка кругов на неровную поверхность подсыпки (без присыпки) Повышенная температура или увеличенная выдержка при конечной температуре обжига	Смешивание Формование Обжиг " "
Занижение твердости (понижение твердости более чем на две степени (в массовом количестве)) и понижение твердости на две степени	14	Нарушение рецептуры при приготовлении формовочной смеси Нарушение режима формования Нарушение карт постановки заготовок на печной вагон Нарушение режима термообработки	Смешивание Формование Обжиг "
Завышение твердости (завышение твердости более чем на две степени (в массовом количестве)) и завышение на две ступени	15	Нарушение рецептур при приготовлении формовочной смеси Нарушение режимов формования (навески) Нарушение карт постановки заготовок на печной вагон Нарушение режима термообработки	Смешивание Формование Обжиг "
Бой кругов (куски кругов и их половинки)	16	Небрежность рабочего в обращении с кругами на всех переделах техпроцесса	Транспортирование
Сколы (круги со сколами, превышающими размеры, допустимые для переточки кругов на последующий размер)	63	Небрежность рабочего с кругами на всех переделах техпроцесса	Транспортирование
Неуравновешенность масс (дисбаланс)	18	Некачественное смешивание формовочной смеси Неравномерная укладка формовочной смеси в пресс-форму Неисправность и изношенность прессового оборудования и оснастки Неправильная механическая обработка (непараллельность сторон, смещение центра отверстия)	Смешивание Формование Техническое обслуживание Механическая обработка

Окончание табл. 3.35

Вид и особенности брака	Шифр брака	Причины брака	Операция технологического процесса
Разрыв круга при испытании механической прочности	30	Некачественное смешивание формовочной смеси Неравномерная укладка формовочной смеси Неисправность и изношенность прессового оборудования и оснастки Нарушение режимов сушки и термообработки Неправильное испытание инструмента на механическую прочность (крепление круга на испытательном станке, использование изношенных оправок и приспособлений)	Смешивание Формование Техническое обслуживание Сушка и обжиг Контроль
Несоответствие размеров круга (отклонение геометрических размеров от заданных величин)	20	Несоответствие исходных материалов Применение изношенных кольца и оправки Неправильная установка пресс-формы Недостаточное или повышенное давление при прессовании (несоблюдение расчетной навески) Применение изношенных формовочных и сушильных плит Нарушение карт постановки заготовок на печные вагоны Нарушение геометрических размеров при механической обработке	Смешивание Техническое обслуживание То же " Обжиг Механическая обработка
Капли на поверхности заготовок после обжига	12	Состояние термического оборудования	Термическая служба предприятия
Массовый брак	65	Отключение электропечи или подачи газа Авария на термическом оборудовании	–

обжига и охлаждения. Происхождение трещин, вероятно, вызвано напряжениями, возникающими при обжиге и охлаждении изделий (рис. 3.82).

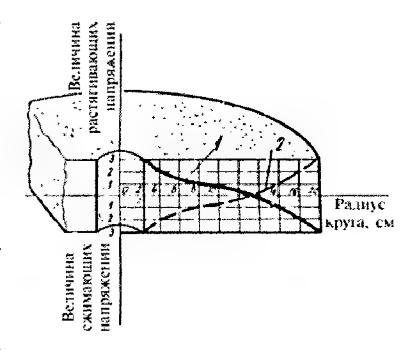


Рис. 3.82. Схема распределения тангенциальных напряжений в абразивном круге при обжиге и охлаждении:

1 — напряжения при нагревании;
2 — напряжения при охлаждении

Как видим, при нагревании абразивного круга растягивающие напряжения максимального значения расположены у его отверстия, а сжимающие — у периферии.

Сжимающие напряжения не могут вызвать образования трещины, следовательно, при неравномерном или вообще несоответствующем нагреве (повышении температуры) трещины могут возникать только в центре круга.

При охлаждении наблюдается обратная картина. Растягивающие напряжения максимального значения расположены у периферии круга, поэтому несоответствующие условия охлаждения могут привести к образованию периферических трещин. Образование периферических трещин возможно также и при нагреве, сосредоточенном в определенном месте колонки кругов. Трещины образуются вследствие непосредственного влияния возникающих и исчезающих факелов пламени на всем нагретом участке.

Появление "сетки" трещин на изделиях из электрокорунда возникает в результате конденсации влаги на относительно холодных изделиях при нагревании их газами с высоким содержанием паров воды, например на таких, как продукты сжигания природного газа или мазута. Появление сетки трещин в результате конденсации паров воды наблюдается в изделиях во время их сушки или обжига при температуре ниже 100 °С; для их ликвидации необходимы более тщательная сушка изделия или повышение температуры газов во входной части туннельной печи. Радиальные трещины от центра образуются при обжиге в результате напряжений, возникающих при нагревании и охлаждении кругов как в пластичном, так и в хрупком состоянии. Разрыв происходит по мостикам связки и абразивным зернам. Трещины с неровной поверхностью разрыва получаются как при нагревании, так и при охлаждении черепка в пластичном состоянии или в недостаточно прочном, слабо обожженном изделии.

Интенсивное охлаждение колонки кругов с периферии создает значительный перепад температур по радиусу кругов. При дальнейшем, более медленном охлаждении происходит выравнивание температур по всему объему изделий; у отверстий кругов возникают растягивающие напряжения, в результате которых круги иногда разрываются. Аналогичные явления происходят и при интенсивном нагревании колонки кругов с периферии. В обоих случаях макроструктура и окраска поверхностей весьма сходны. Однако рассмотрение поверхностей разрыва под бинокулярной лупой позволяет с достаточной уверенностью судить о том, в какой период обжига образовались трещины — при нагревании или

при охлаждении. При разрыве черепка в пластичном состоянии связка, растягиваясь, образует в плоскости разрыва большое количество тонких волосков, хорошо сохраняющихся в процессе охлаждения и видных под лупой. Если же разрыв произошел в процессе нагревания, то при дальнейшем повышении температуры волоски связки расплавляются и становятся незаметными.

Кольцевые сплошные или прерывистые трещины обычно возникают в кругах по радиусу как при сушке, так и при максимальной температуре обжига.

Известно, что при интенсивном нагревании изделий в процессе сушки и при слабом испарении влаги вследствие термодиффузии концентрация воды в менее нагретых частях изделия возрастает по сравнению с исходной.

С увеличением влажности материала и повышением температуры, следовательно, с уменьшением поверхностного натяжения воды прочность сцепления частиц материала уменьшается; напряжения, возникающие в кругах при формовке, релаксируются за счет образования внутренних трещин в плоскости, где температура наиболее низка.

Кольцевые трещины при максимальной температуре обжига образуются вследствие понижения вязкости черепка ниже допустимого предела, когда круг начинает деформироваться под тяжестью собственного веса. Понижение вязкости возможно при завышении температуры обжига и нарушении рецептуры связки или изделия (рис. 3.83).

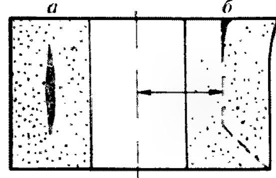


Рис. 3.83. Кольцевые трещины: *а* — при неправильной сушке; *б* — при понижении вязкости черепка в результате обжига

Так как деформация маловязких черепков подобна деформации сыпучих влажных материалов, смещающихся к основанию под углом естественного откоса, "оползни" в высоких кругах начинаются в верхней части, и трещина, образующаяся по радиусу r_1 на верхней плоскости, распространяется вертикально по цилиндру, а по достижении плоскости сдвига (при значительной деформации) сходит на конус.

Таким образом, концентрические трещины внутри обожженных кругов, располагающиеся вблизи основания, образуются в результате неправильной сушки. Кольцевые трещины на верхней плоскости высоких изделий получаются вследствие понижения вязкости черепка при максимальной температуре обжига.

3.8. Контроль качества, маркировка, хранение и упаковка абразивного инструмента

Абразивные изделия подвергаются контролю на соответствие геометрическим размерам (наружный диаметр, высота, диаметр посадочного отверстия, параллельность плоскостей, эксцентриситет и т. д.) по ГОСТ 2424–83, а также на наличие трещин, раковин, сколов, пятен, "мушек" и других дефектов — по ГОСТ 2424–83, по твердости — по ГОСТ 18118–79, 192-02–80 (с 01.01.2008 ГОСТ Р 52587–2006) и ГОСТ 25961–83 (с 01.01.2008 ГОСТ

Р 52710–2008), по неуравновешенности — по ГОСТ 3060–86, по механической прочности — по ГОСТ 12.3.028–82 (с 01.01.2008 ГОСТ Р 52588–2006). Также качество инструмента оценивается сравнением их количественных показателей с показателями лучших образцов отечественного производства или иностранных фирм.

Автор [231] предлагает примерные критерии оценки качества абразивных инструментов по их шлифующей способности для ряда распространенных операций шлифования (табл. 3.36).

Таблица 3.36

Критерии оценки качества абразивных инструментов для ряда операций шлифования

Вид шлифования	Детали	Операция	Критерии оценки качества абразивного инструмента
Круглое наружное (врезное) в центрах	Коленчатые валы	Шлифование шеек	Стойкость между правками в количестве обработанных шеек. Стойкость до полного износа в количестве обработанных шеек. Машинное время обработки одной шейки и бурта
Бесцентровое наружное	Кольца подшипников	Шлифования по наружному диаметру	Шероховатость обработанной поверхности, наличие или отсутствие прижогов. Стойкость до полного износа в часах машинного времени. Производительность, см^3 снятого в час металла
Внутреннее	Наружные кольца подшипников	Шлифование отверстий	Шероховатость обработанной поверхности, наличие или отсутствие прижогов. Стойкость круга между правками, шлифуемой поверхности
Шлицешлифование	Протяжки	Шлифование шлицев	Шероховатость обработанной поверхности, наличие или отсутствие прижогов. Стойкость круга между правками ,м шлифуемой поверхности
Резьбошлифование	Метчики	Шлифование резьбы	Шероховатость обработанной поверхности, наличие или отсутствие прижогов. Стойкость круга между правками в количестве обработанных метчиков или отсутствие прижогов. Производительность в количестве метчиков, обработанных за час или за смену
Зубошлифование	Зубчатые колеса	Шлифование зубьев	Стойкость между правками в минутах. Стойкость до полного износа в количестве обработанных колес или зубьев. Производительность в количестве зубчатых колес, обработанных за смену
Затачивание	Режущий инструмент	Затачивание: а) твердого сплава; б) стального инструмента	Стойкость до полного износа в количестве заточенных инструментов. Производительность в количестве инструментов, заточенных за час. Наличие или отсутствие прижогов или трещин, шероховатость поверхности

Вид шлифования	Детали	Операция	Критерии оценки качества абразивного инструмента
Обдирочное	Прокат	Обдирка	Производительность, кг металла, снятого за час. Удельная производительность
Ленточное	Лопатки турбин	Шлифование корыта	Стойкость ленты до полного затупления, кг металла, снятого с 1 $см^2$ ленты. Производительность, кг металла, снятого с 10 см ширины ленты в час. Шероховатость обработанной поверхности

Проверка размеров кругов осуществляется с применением универсальных измерительных инструментов (штангенциркули, скобы, глубиномеры, масштабные линейки, микрометры) или специальных приборов, шаблонов, пробок и т. д.

Проверка геометрических размеров производится с помощью штангенциркулей, соответствующих ГОСТ 166–89, типов ШЦ-1000 (для замера наружного диаметра), ШЦ-800 (для замера диаметра отверстия), ШЦ-125 (для замера высоты круга). Измерения наружного и внутреннего диаметров производятся в двух точках взаимно перпендикулярных плоскостей по рабочей и нерабочей сторонам. Для определения параллельности плоскостей шлифовального круга измеряется его высота в четырех диаметрально противоположных точках и вычисляется разность наибольшего и наименьшего значений высоты. Параллельность выточек проверяется глубиномером.

В производственных условиях разбраковку абразивных кругов по геометрическим параметрам, в частности по эксцентриситету и непараллельности торцов, производят с учетом значений координат в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Круг бракуется, если значения хотя бы одной из координат x и y превосходят стандартные.

Контроль эксцентриситета и непараллельность торцов, измеренных в двух случайных ортогональных плоскостях, имеет большую погрешность в определении фактического качества шлифовальных кругов [232].

Авторами [233] экспериментально доказано, что для повышения точности контроля необходимо использовать связь между геометрическими параметрами и неуравновешенностью. Если разбраковка кругов по эксцентриситету и непараллельности торцов производится при измерениях в одной плоскости, то объективность контроля значительно увеличивается при измерениях в плоскости, совпадающей с вектором неуравновешенности.

Для наиболее распространенного контроля в двух ортогональных плоскостях также следует одну из плоскостей ориентировать по направлению вектора неуравновешенности. Причем введение второй плоскости измерения, ортогональной первой, повышает объективность контроля для эксцентриситета отверстия на 33 %, для непараллельности торцов — на 50 %.

Наибольшую точность контроля указанных параметров можно обеспечить при измерении торцевого и радиального биения, если одну из поверхностей принять за базу.

Годные по геометрическим размерам круги направляются на контроль статического дисбаланса, по испытанию механической прочности и твердости по указанным выше ГОСТам.

Прошедшие все контрольные операции круги маркируются по трафарету в соответствии с ГОСТ 2424–85 водостойкой краской, обеспечивающей сохранность маркировки в процессе транспортирования кругов, следующего состава: сажа марки ПН-25 — 25–30 %, керосин — 70 %, краска офсетная (черная нейтральная по ГОСТ 2123–01) — 5 %.

Транспортировка, хранение и упаковка готовой продукции производятся в соответствии с ГОСТ 27595–88.

Укладка кругов в транспортной таре, ящиках, поддонах и контейнерах должна быть плотной, не допускающей их взаимного относительного перемещения. Дно транспортной тары, поддонов, дно контейнеров и транспортных средств при укладывании кругов без потребительской и транспортной тары и без поддонов должно быть выстлано сплошным слоем сухих опилок по ГОСТ 18320–78, древесной стружкой по ГОСТ 5244–79 толщиной не менее 30 мм или другого амортизирующего материала.

Стопки кругов должны быть переложены гофрированным картоном по ГОСТ 7376–79 или древесной стружкой по ГОСТ 5244–79. От стенок и крышки транспортной тары и ящиков поддона, от стенок и двери контейнера инструмент отделяют слоем сухих опилок, стружки и деревянными клиньями, решетками, досками, картоном.

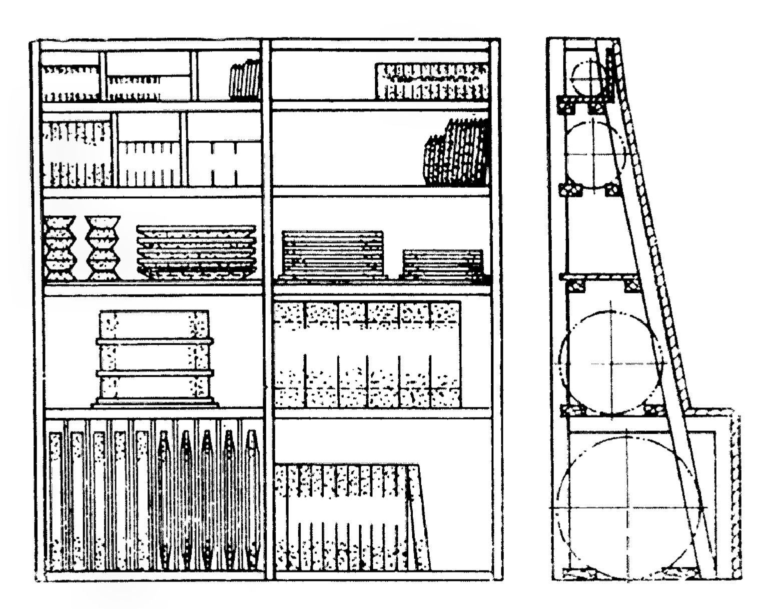


Рис. 3.84. Схема хранения шлифовальных кругов на стеллажах

Абразивные инструменты должны храниться в помещении при температуре не ниже 5 °С и влажности не более 65 %, не подвергаться каким-либо сотрясениям и ударам. Склад для хранения должен отапливаться и быть достаточно светлым.

Круги следует хранить на стеллажах, причем мелкие круги — в ящиках или коробках, удобных для хранения различных по конструкции и размерам кругов. Стеллажи должны быть прочными и обеспечивать легкий доступ к хранящимся абразивным инструментам. Полки стеллажей для кругов, предназначенных для хранения на ребре, изготовляются так, чтобы круг поддерживался в двух точках и не выкатывался. Стеллажи могут быть деревянными или металлическими. Ячейки металлических стеллажей должны быть обшиты деревом или прочным мягким материалом.

Выработан ряд схем безопасного хранения абразивных инструментов в зависимости от их конструкции и размеров (рис. 3.84).

Рекомендуемые способы хранения шлифовальных кругов, головок, брусков и сегментов регламентированы ГОСТ 4785–64.

3.9. Анализ оборудования ведущих зарубежных фирм, применяемого для производства абразивного инструмента

Анализ лицензионных материалов, изучение проспектов и каталогов оборудования ведущих зарубежных фирм "Джи энд Би" (Канада), Tyrolit (Австрия), Paul Rippel (Германия), "АМНИ", Bando (Южная Корея), посещение отечественными специалистами отдельных заводов в Чехии, Венгрии, Германии, Японии, Китае и др., а также опыт работы в отечественной промышленности на оборудовании, закупленном у отдельных фирм, позволяют оценить технический уровень зарубежного оборудования [234].

Оборудование для приготовления формовочной смеси

Ведущие зарубежные фирмы в процессе приготовления формовочной смеси отдают безусловное предпочтение весовому дозированию компонентов (зерна, связки, декстрина и др.).

При дозировании компонентов формовочной смеси фирма "Джи энд Би", например, применяет автоматические весовые дозаторы дискретного действия, исключающие субъективное влияние оператора на точность взвешивания.

В случае контроля взвешивания рекомендуется снабжать весовое устройство прибором для фиксации и записи действительного значения взвешенной дозы, что дает возможность вести контроль взвешивания и, по мнению фирмы, психологически воздействовать на оператора.

Погрешность взвешивания весовых устройств, применяемых на зарубежных фирмах, находится в пределах ±1 %, что не противоречит отечественной практике.

В процессе приготовления формовочной смеси с точки зрения качества смешивания отдается предпочтение смесителям с планетарным движением перемешивающего органа, аналогично применяемым в отечественной практике, однако наряду с этим рекомендуются и противоточные смесители (рис. 3.85). На рис. 3.86 представлен участок по производству формовочных смесей на противоточных смесителях.

На абразивных заводах в Швейцарии и Германии применяют мешалки типа "Эриха", работающие методом противотока, зигзагообразные смесители различной емкости (от 2 до 400 кг).

На заводах фирмы Bay State (США) работают установки автоматической дозировки и смешивания формовочных смесей.

Можно предположить, что это противоречие объясняется необходимостью иметь смеситель более удобный для частых и тщательных промывок при переходе от смешивания крупнозернистых материалов к мелкозернистым, что характерно для предприятий малой мощности, имеющих иногда всего один смеситель.



Рис. 3.85. Зарубежная противоточная смесительная машина

Фирмой "Джи энд Би" предлагается оригинальное устройство для передачи выгруженной из смесителя формовочной смеси на просеивающее устройство. Устройство представляет собой опрокидывающийся бункер, выходное отверстие которого закрыто ленточным транспортером. Из опрокидываемой части смесителя формовочная смесь высыпается в бункер, из которого ленточным транспортером подается на просеивающее устройство.

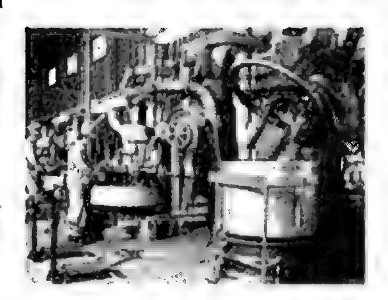


Рис. 3.86. Участок по производству формовочных смесей

Фирма отмечает, что повышению качества и стабильности характеристик абразивного инструмента способствуют автоматизированные комплексы смесеприготовления, включающие емкости для накопления компонентов, устройства для дозирования компонентов, смесители, просеивающие устройства и тару для хранения приготовленной смеси, однако такие комплексы за границей единичны по следующим причинам: затраты на автоматизацию (малая экономическая эффективность, а социальный эффект, видимо, не учитывается), неудачно сложившееся территориальное расположение участков на предприятиях и большая, часто меняющаяся номенклатура изделий, затрудняющая переналадку комплексов.

Сравнительная характеристика отечественного смесительного оборудования и оборудования фирмы "Джи энд Би" приведена в табл. 3.37.

Оборудование для дозирования формовочной смеси в пресс-форму и прессование абразивных изделий

При формовании абразивного инструмента зарубежные фирмы основное внимание уделяют дозированию и укладке формовочной смеси в пресс-форму.

Таблица 3.37

Сравнительная характеристика смесительного оборудования фирмы "Джи энд Би" и отечественного оборудования

Страна	Тип, модель	Объем чаши, $дм^3$	Диаметр чаши, мм	Высота чаши, мм	Частота вращения лопастей чаши, об/мин	Загрузка, кг	Мощность установки, кВт	Зернистость формовочной смеси	Форма чаши	Форма лопастей и ее вид	Способ разгрузки	Тип увлажнителей	Механизация	Качество смеси	Производительность, кг/ч
Канада	300-литровая перемешивающая система-агрегат	300	1200	350	–	270	70, с приводами механизации	Мелкозернистая	Цилиндрическая с плоским дном	Простая с планетарным движением	Путем опрокидывания	Парафиновая эмульсия	Масса опрокидывается на ленточный питатель и протирается на сите	Масса сыпучая и однородная	540
Россия	СМ-200К	200	850	350	$\frac{54,6}{21,3}$	100	6,7, только смесителя	То же	То же	Простая с простым движением	То же	Жидкое стекло	Масса опрокидывается на противорочное сито без питателя	Масса недостаточно сыпучая, с наличием комков	300
Россия	СМ-400КП	400	1050	460	$\frac{55,0}{20}$	200	9,9, только смесителя	"	"	То же	"	То же	То же	То же	600

Из различных способов дозирования ведущие зарубежные фирмы отдают предпочтение весовому дозированию навесок и допускают объемное дозирование для кругов диаметром менее 350 мм. Фирмой "Цинцинатти" (HYDRAMET) (США) выпускаются прессы с объемным дозированием для кругов диаметром 40 мм, производительностью 45000 шт./м. Автоматическое весовое дозирование формовочной смеси выполняется на автоматических весах с подачей материала из бункера посредством ленточного питателя. Скорость ленточного питателя изменяется — большая в начале подачи и меньшая при приближении к набору заданной массы. Это способствует более точному взвешиванию "навески".

Отечественные, в большинстве случаев тарельчатые, питатели не обладают такими качествами. По утверждению зарубежных фирм погрешность дозирования достигает 0,25 %, а погрешность весового дозирования формовочной смеси в отечественной практике не превышает 1 %. Фирмы также не рекомендуют использовать вибропитатели для подачи формовочных смесей, обосновывая это возможностью расслоения смесей.

Укладка формовочной смеси с помощью ленточного транспортера во вращающуюся пресс-форму получила широкое распространение в наиболее развитых странах и обеспечивает получение качественного инструмента (рис. 3.87).

Прессование изделий, по данным зарубежных фирм, осуществляется, как правило, на прессах с нижним давлением, по сравнению с отечественными они изготавливаются большей жесткостью и точностью, что позволяет производить абразивный инструмент без применения гидроплиты с равномерной плотностью. Съем кругов осуществляется либо с нижней формовочной плитой, либо переворотом формовочной плиты с кругом на сушильную плиту. Кроме того, в последнее время на фирме появились автоматизированные стационарные пресс-автоматы, позволяющие увеличить производительность прессов до 40 % (рис. 3.87).

Зарубежные фирмы придают большое значение качеству изготовления пресс-форм и увеличению срока их службы как факторам, в значительной степени влияющим на качество формуемых изделий.

Фирмы отмечают целесообразность изготовления буксирных и других плит, передающих силовые нагрузки, из чугуна как более жесткого, чем сталь, материала, в целях уменьшения упругих деформаций, а мелких пресс-форм — из карбида бора или карбида вольфрама.

В целях повышения качества формуемых изделий в пресс-формах для низких кругов диаметром менее 400 мм, формуемых на автоматических прессах, цилиндрические рабочие поверхности форм можно, по мнению фирм, выполнять без традиционной конусности, цилиндрическими, что будет препятствовать выдавливанию облоя в зазоры, появление которых ведет к нарушению равноплотности и уравновешенности круга.

Применение оборудования с указанными характеристиками позволяет повысить выход инструмента в одну степень твердости, увеличить выход кругов первого класса неуравновешенности, снизить припуски при формовании и, следовательно, уменьшить расход сырьевых материалов на 1 т инструмента при его высоком качестве.



Рис. 3.87. Стационарный пресс-автомат фирмы NAXOS-UNLON (Германия)

Интерес представляет пресс канадской фирмы "Джи энд Би" модели 7,5 МН, принципиально отличающийся по конструкции от всех отечественных прессов. Установка фирмы "Джи энд Би" позволяет в ручном либо автоматическом режиме выполнять все операции формования. В установке использован принцип трехпозиционной работы, включающей весовое дозирование, автоматическую укладку формовочной смеси, прессование по заданной высоте, предварительное осаждение кольца пресс-формы, выталкивание, съем и перемещение заформованной заготовки пневматическим съемником. Тележка с формовочной смесью помещается в опрокидыватель, и с помощью скипового подъемника формовочная смесь подается в приемный бункер пресса. На пульте пресса устанавливается навеска и высота формуемой заготовки. Дозирование формовочной смеси осуществляется спецузлом, состоящим из бункерно-ленточного питателя и автоматических весов. С помощью транспортируемой ленты ленточного питателя формовочная смесь подается в бункерно-ленточный питатель, который работает в сочетании с поворотным столом для подачи формовочной смеси в пресс-форму. Скорости вращения пресс-формы и питателя имеют бесступенчатую регулировку для выбора необходимой скорости подачи смеси. Поворотный стол приводится в действие гидроцилиндром. После установки в положение заполнения пресс-формы формо-

вочной смесью стол фиксируется, пресс-форма вращается с заданной скоростью. Точное позиционирование стола обеспечивается гидроприводным конусным фиксирующим штырем. После заполнения пресс-формы смесью можно проверить на электронном табло соответствие навески установленному значению. Уплотняющее и разравнивающее устройство для обеспечения равномерного уплотнения смеси в пресс-форме работает вместе с бункерно-ленточным питателем.

При операции разравнивания формовочной смеси устанавливается позиция "Воздух под трамбовку". По окончании заполнения и укладки смеси производится поворот стола в соответствующую позицию для последующего формования.

При достижении пресс-формой позиции прессования на дисплее устанавливается позиция "Прессование". Плунжер перемещается двумя цилиндрами двойного действия, установленными по обе стороны верхней секции пресса. Нижняя секция оснащена системой "плавающей" установки пресс-формы для обеспечения прессования в двух направлениях по вертикали (подпрессовки). Для формования заготовок кругов до заданной высоты пресс оборудован стандартной системой контроля давления и электронно-гидравлической сервосистемой для прессования до заданной высоты. Сервосистема снабжена цифровой индексацией для облегчения установки на нужную высоту и для обеспечения активного контроля высоты непосредственно при прессовании. После снятия давления осуществляется осаждение кольца пресс-формы при помощи специальной поворотной плиты и основного плунжера. По окончании прессования выполняется операция на позиции "Выпрессовка", затем "Индексация" — установка пресс-формы на позицию выталкивания круга из кольца. Выталкивание заформованной заготовки из пресс-формы происходит при соответствующем положении поворотного стола.

Узел выталкивания состоит из зажима и толкателя. Толкатель включает в себя электромагнит с вырезом для размещения центральной опоры пресс-формы, служащей для предотвращения перекоса нижней рабочей плиты при опускании ее в пресс-форме. Для выталкивания круга из пресс-формы на дисплее набирается пункт "Подача". При повороте и фиксации поворотного стола зажим удерживает кольцо пресс-формы, а толкатель выталкивает заготовку.

Съем заготовки осуществляется при помощи кнопочного управления пневматическим кольцевым съемником, установленным на кран-балке. Заготовки круга разгружаются по одной штуке на заранее подготовленную сушильную плиту, которая переносится на сушку. Циклы формования продолжаются на второй и третьей пресс-формах.

Оборудование для термической обработки абразивных изделий

В зависимости от условий производства зарубежные фирмы применяют естественную сушку крупнозернистого инструмента диаметром менее 350 мм. Исключение составляют мелкозернистые изделия, которые проходят принудительную сушку, при этом высушиваются до полного удаления гигроскопической влаги и, во избежание адсорбции влаги из атмосферы, сразу же после сушки поступают на обжиг. Остальные изделия сушатся в сушилах. За рубежом, как и в отече-

ственной практике, используются два типа сушил: туннельные проходные сушила длиной 30–40 м и сушила периодического действия. Продолжительность сушки зависит от многих факторов: размеров изделий, зернистости, абразивного материала, характеристики абразивных кругов, их структуры и др.

В качестве сушильного агента фирмы используют отходящие газы туннельных печей. Используются и электрические сушила, т. е. процесс сушки на зарубежных фирмах аналогичен отечественным условиям сушки.

Зарубежные фирмы для обжига абразивного инструмента применяют туннельные, электрические щелевые, а также колпаковые печи периодического действия (типа Bikley) разного объема (рис. 3.88). Туннельные и колпаковые печи работают на газе и мазуте. Длина туннельных печей — от 50 до 100 м.

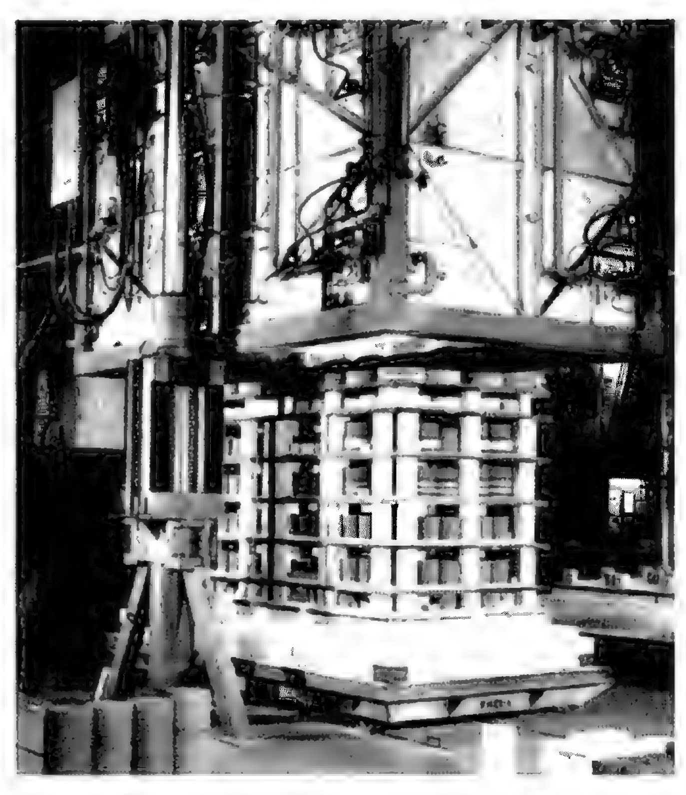


Рис. 3.88. Колпаковая печь с вагонеткой, загруженной абразивным инструментом

Туннельным печам зарубежные фирмы отдают предпочтение, однако считают, что в туннельных печах целесообразно обжигать круги диаметром, не превышающим 350 мм, и высотой до 100 мм, или второй вариант — круги диаметром до 500—600 мм. Более крупный ассортимент необходимо обжигать в периодических (колпаковых) печах или в туннельных.

Температура обжига в фирмах, в зависимости от номенклатуры и связки, задается от 1210 до 1350 °С. Атмосфера во всех печах окислительная, коэффициент избытка воздуха в зоне обжига составляет 1,05—1,20 свободного кислорода — 4 %.

Для обжига изделий сложной конфигурации и кругов диаметром от 100 мм и меньше предлагается применять специальные керамические капсулы или поддоны с габаритными размерами 381 × 381 мм, что даст возможность механизировать загрузку таких изделий на вагоны и выгрузку после обжига.

Нагрев садки кругов от 250 до 1250 °С для разного диаметра и высоты осуществляется с различной скоростью (табл. 3.38).

Общая длительность обжига зависит от геометрических размеров изделий — диаметра и высоты. Фирма "Джи энд Би" предлагает оптимальные режимы обжига для усредненных типоразмеров кругов (табл. 3.39).

Таблица 3.38

Скорость нагрева кругов разного диаметра и высоты

Геометрические размеры круга, мм		Тип печи	Допустимая скорость нагрева, °С/ч, не более
Максимальный диаметр	Максимальная высота		
350	100	Туннельная	100
600	150	Периодическая	62,5
600	300	"	25
1067	50	"	25
1524	608	"	10

Таблица 3.39

Режимы обжига кругов в зависимости от их геометрических размеров

Геометрические размеры круга, мм		Тип печи	Продолжительность нагрева, ч, в диапазоне нагрева, °С						Продолжительность режима обжига, ч
Диаметр	Высота		25–250	250–1250	Выдержка при 1250 °С	1250–600	600–400	400–60	
350	50	Туннельная	5	10	1	2	3	3	24
350	100	То же	5	10	1	3	7	6	32
608	150	Периодическая	7	16	2	8	11	8	48
608	300	То же	18	40	2	8	27	25	120
1067	50	"	45	40	2	24	–	25	120
1254	508	"	–	100	5	–	68	68	215

Предельно допустимые скорости нагрева и охлаждения абразивного инструмента в печных агрегатах России и за рубежом близки. Однако обжиг инструмента на отечественных заводах и на заводах других стран СНГ в основном осуществляется в туннельных и щелевых печах, причем в туннельных печах обжигаются круги всех размеров (от 100 до 1100 мм). В электрических печах обжигаются круги диаметром от 100 до 500 мм. Скорости нагрева на отечественных печах допускаются более высокими (в два раза). В то же время выдержка инструмента в зоне максимальной температуры занимает более продолжительное время (в 1,5 раза).

Интерес представляет колпаковая печь фирмы Bikley (Канада), которая обеспечивает плавную регулировку температуры, незначительный перепад температуры по высоте вагонетки, равный ±5 °С, возможность автоматизировать и менять тепловой режим и обжигать любые виды изделий.

Ниже приводится характеристика одной из печей фирмы Bikley (см. рис. 3.88).

Колпаковая печь периодического действия, работающая на природном газе, представляет собой термоагрегат для обжига абразивных изделий установочным объемом около 12 $м^3$ с максимальной рабочей температурой 1330 °С и габаритными размерами (длина × ширина × высота) 3760 × 1800 × 1677 мм.

Она состоит из колпака; двух вагонеток; транспортного восьмиколесного устройства для транспортирования вагонеток в печь и из нее; гидроцилиндров подъема колпака, гидростанции, высокотемпературного вытяжного вентилятора, снабженного дымоходом и воздуховодом; рельсового пути и пульта управления с контрольно-измерительной аппаратурой, включающей в себя:

систему регулирования температуры;

систему автоматического регулирования давления в печи;

систему автоматического регулирования и подачи воздуха;

аппаратуру автоматического прекращения подачи топлива в целях регулирования охлаждения;

систему регулирования превышения температуры.

Колпак печи представляет собой сварную конструкцию с усиливающими элементами, покрытую изнутри огнеупорным материалом. В процессе работы колпак опускается на вагонетку обжиговой печи, создавая между двумя указанными элементами плотное соединение.

Газовые горелки общим количеством восемь штук марки Bikley "Изоджет" высокоскоростные, имеющие двойной диапазон, устанавливаются в колпаке в двух различных зонах, одна из которых является регулирующей для верха, а вторая — для низа обжиговой печи.

Указанные горелки двойного диапазона имеют автоматическое переключение между верхним и нижним режимами работы пламени. Они способствуют повышению регулируемости температуры факела пламени таким образом, что температура в печи может поддерживаться на столь низком уровне, как 60 °С, по сравнению с температурой 200 °С, характерной при работе без использования горелок двойного действия.

Анализ работы печных агрегатов, их состояние в России и других странах СНГ по сравнению с современным технологическим оборудованием, выпускаемым зарубежными фирмами Bikley, Ridhammer (Германия), Ficolaforni, Saftforni

(Италия), Nabertherm (Германия), Fornoceramica (Португалия), Horsemecas (Испания) и др. позволяют сделать следующие выводы:

технология обжига абразивного инструмента в России и других странах СНГ является затратной операцией, так как действующие тепловые агрегаты, построенные в 60–70-х годах прошлого столетия, морально и физически устарели. За последние годы отдельные предприятия произвели капитальный ремонт печей, но технология при этом осталась без изменений (без обновления элементов нагрева и модернизации процесса);

действующие предприятия не располагают современным газовым оборудованием, огнеупорным волокнистым материалом, специальными огнеупорами, автоматикой безопасности, микропроцессорными системами управления тепловыми режимами и контролем газовой атмосферы. Применение волокнистых и других огнеупорных материалов, имеющих температуры начала деформации выше применяемых температур обжига, приводит к снижению потерь тепла с 15–22 % (отечественные печи) до 5 %, к уменьшению стенок с 1,5 м до 200 мм и к использованию плоского свода;

использование современного газового оборудования обеспечивает увеличение скорости пламени, использование длинного факела, что приводит к увеличению теплопередачи, уменьшению тепловых нагрузок в зонах подачи топлива и к достижению перепадов температур по садке 5–10 °С;

применение автоматических систем управления приводит к уменьшению материальных и энергетических затрат за счет исключения человеческого фактора, а также к экономии топлива на 10–12 %;

применение специальных огнеупоров и конструкций вагонеток уменьшает теплопотери в 2–5 раз, массу вагона — в 3 раза, термостойкость огнеупорных материалов повышается до 30 раз, жесткость и схема установки огнеупорных плит снижают напряжение в 3–4 раза. Это дает возможность снизить расходы топлива на 5–10 % и на огнеупорные материалы — в 20–30 раз.

В целом современное термическое оборудование позволяет снизить эксплуатационные затраты на топливо с 0,2–1 до 0,7–0,1 $м^3$/кг изделия; на электроэнергию — с 0,127–0,6 до 0,015–0,03 кВт·ч/кг, на огнеупорные материалы — с 10–40 до 0,3–0,6 кг/г и увеличить сроки эксплуатации печей с 5–10 до 20–30 лет. При этом скорость нагрева, охлаждения, градиенты температур в зоне выдержки удовлетворяют требованиям обжига абразивных кругов.

В настоящее время ЗАО "Институт керамического машиностроения" (Украина) занимается развитием технологии термической обработки изделий, конструированием и изготовлением термического оборудования, в том числе электрических, камерных и газовых печей.

В основу современных газовых печей нового поколения ЗАО "Керамаш" закладывает:

применение скоростного обжига, позволяющего сократить цикл;

применение современных волокнистых материалов, позволяющих уменьшить теплоотдающую поверхность печи;

применение газового оборудования, КИП, автоматики безопасности, позволяющего безопасное ведение техпроцесса обжига, сжигание газа непосредственно в рабочем канале печи и исключающее из конструкции печи горелочные камни, топки, которые ведут к перегреву футеровки и горелок;

применение легковесного огнеприпаса, сокращающего затраты тепла;

использование системы ИЗО-ДЖЕТ, позволяющей поддерживать неравномерность температур в рабочем канале в пределах ±5 °С;

применение плоского свода, позволяющего рационально использовать пространство рабочего канала печи и упростить конструкцию печи;

использование отношения ширины рабочего канала к его высоте как 6 : 1 для лучших аналогов, что способствует поддержанию равномерной температуры по высоте канала;

применение скоростных длиннофакельных горелок, что способствует поддержанию равномерной температуры по ширине канала;

автоматическое поддержание температурного режима индивидуально для каждой вагонетки, что позволяет загружать вагонетки с разной плотностью садки;

автоматизацию всех процессов обжига: подъем температуры, охлаждение, давление или разрежение в печи, среда (окислительная, восстановительная, нейтральная), что исключает отрицательное влияние человеческого фактора на процесс обжига.

В конструкции газовых печей нового поколения применены следующие комплектующие материалы иностранных фирм:

1) газовые горелки, автоматика безопасности, регулирующее и запорное газовое оборудование фирмы Kromschroder (Германия);

2) вентиляционное оборудование фирмы Electror (Германия);

3) приборы терморегулирующие и регистрирующие фирмы Ascon (Италия);

4) волокнистый огнеупорный материал фирмы Orient Cerwool (Индия) по лицензии фирмы Premier (США);

5) огнеприпас — пространственная сборно-разборная этажерка фирмы Anna Werk (Германия) для универсальной садки.

Газовые печи комплектуются прибором TESTO-350 (Германия), при помощи которого производится периодический контроль содержания в продуктах горения кислорода, углекислого газа, окиси углерода, окиси и двуокиси азота, двуокиси серы, а также измерение температуры, давления, разрежения, скорости потоков воздуха и дымовых газов, коэффициента избытка воздуха.

Использование современных обжиговых технологий и оборудования позволяет поднять до европейского уровня показатели по удельному расходу электроэнергии на единицу продукции, уменьшение брака изделий и по охране окружающей среды.

Оборудование для механической обработки абразивных изделий

В целях экономии материалов, а также для получения различных форм фасонного профиля зарубежные фирмы широко применяют предварительную обработку сырых (или просушенных) кругов, так называемое шевингование; последнее делается на простейших ручных станках типа "гончарный круг".

В целом в зарубежной технологии механической обработки применяется стандартное оборудование: обдирочные токарные и шлифовальные станки и режущие абразивные инструменты; чугунная или стальная дробь; коничe-

ские стальные резцы; шлифовальные абразивные круги и алмазные инструменты. Однако следует отметить, что зарубежное оборудование имеет более высокую точность обработки, более высокую степень механизации (встроенной или дополнительно оснащенной) и автоматизации, а также отличается системой переналадки на широкий диапазон обрабатываемых по высоте кругов (до 600 мм) с системой активного контроля с цифровой индексацией получаемого размера обработки.

Для повышения прочности кромок применяется шлифование торцов абразивными сегментами или алмазными инструментами с охлаждением. Этот метод применяется и в отечественном производстве.

Отдельные фирмы считают, что прогрессивным методом обработки плоскости кругов является обдирка с помощью чугунного или стального зерна. Этот же метод применяется и на отечественных станках моделей КШ-32, КШ-62, КШ-64, КШ-122. Однако фирма "Джи энд Би" рекламирует станок, отличающийся от отечественных станков и станков фирмы "АМНИ":

станина станка имеет портальную конструкцию, что обеспечивает повышенную жесткость и точность обработки;

станок имеет систему переналадки на широкий диапазон обрабатываемых по высоте кругов (до 600 мм);

станок оснащен системой активного контроля с цифровой индексацией получаемого размера обработки кругов по высоте.

Зарубежные фирмы точность обработки отверстия ставят в зависимость от номинального диаметра отверстия и назначения использования круга. Так, поле допуска для кругов с отверстиями до 51 мм будет +0,125...+0,025 мм, с 51 до 127 мм — +0,295...+0,050 мм, с 127 до 305 мм — +0,3...+0,1 мм.

Такие требования, особенно для малых кругов, значительно превышают нормы отклонений по ГОСТ 2424−83.

Точность посадочных отверстий достигается методом заливки втулок (калибровка) различными материалами, установкой специальных пластмассовых втулок и расточкой отверстий на специальных станках.

Фирмой Grand B (Канада) разработана двухпозиционная машина для литья втулок шлифовальных кругов под давлением полистиролом, усиленным стекловолокном. Она представляет собой автоматический станок с гидроприводом и имеет позицию загрузки-разгрузки, позицию литья и поворотный кронштейн для перемещения кругов между двумя этими позициями.

Позиция загрузки-разгрузки оборудована четырехходовой системой выталкивания. В позиции заливки втулки имеется автоматический высокоскоростной инжекционный блок для полистирола. Круг и керн удерживаются в инжекционном блоке с помощью зажимного пуансона высокого давления через низ поворотного кронштейна. Заливка втулки производится под высоким давлением в зажатом положении. Инжекционное сопло имеет автоматический клапан.

Однако, по мнению канадской фирмы "Джи энд Би", расточка отверстий является наиболее эффективной. Это подтверждает и отечественный опыт. Замечено, что шлифовальные круги, у которых посадочные отверстия обработаны алмазным инструментом, имеют более высокую прочность на разрыв, объясняется это удалением слоя с микротрещинами по поверхности отверстия, служащими концентраторами напряжения.

Фирма "Джи энд Би" рекомендует вертикально-шлифовальный станок для алмазной обработки посадочного отверстия диаметром до 305 мм шлифовальных кругов высотой до 600 мм. Этот станок оснащен оригинальными средствами механизации установки и съема кругов. Шагающий транспортер удачно вписывается в конструкцию станка. Центрирование кругов на шпинделе при установке производится с помощью центрирующего конуса.

Обработку периферии кругов зарубежные фирмы производят так же, как и отечественные производители, — методом шлифования абразивным инструментом.

Станки ведущих зарубежных фирм оснащены манипуляторами для установки обрабатываемых кругов на стол и для их снятия. В отечественной практике манипуляторы отсутствуют.

Имеются данные, что фирма Automation Egnipment выпускает уникальное оборудование — многооперационные станки для обработки абразивных изделий, которые одновременно калибруют отверстия, обрабатывают периферию круга и испытывают на прочность. Отечественная промышленность таких станков не имеет.

Ниже приводится краткая сравнительная техническая характеристика отечественного и зарубежного оборудования, применяемого для механической обработки абразивного инструмента (табл. 3.40).

Из анализа зарубежного оборудования по механической обработке можно сделать вывод, что обработка плоскостей с помощью чугунного или стального зерна является прогрессивным методом. Этот метод применен на отечественных станках моделей КШ-32, КШ-62, КШ-64 и КШ-122. Если эти станки соответствуют по нормам точности паспортным данным, то они обеспечивают выход кругов класса АА до 60—80 % по непараллельности плоскостей.

Необходимо также отметить, что станки ведущих зарубежных фирм оснащены аппаратурой активного контроля, что полностью отсутствует на отечественных станках, и качество обработки на отечественных станках (при соблюдении действующих норм точности на станки) на 80—90 % зависит от квалификации рабочего-станочника.

Оборудование и приборы для контроля качества абразивного инструмента

Зарубежными фирмами качество абразивного инструмента контролируется по следующим основным параметрам:

испытание на прочность;

проверка посадочных отверстий;

проверка наличия трещин;

определение твердости;

определение уравновешенности;

геометрические параметры;

параметры внешнего вида, не поддающиеся количественной оценке, такие как равномерный цвет круга, отсутствие "мушек", незначительные по величине выкрашивания.

Для определения прочностных свойств используют контрольно-испытательное оборудование с широким применением автоматизированных установок.

Таблица 3.40

Краткая сравнительная техническая характеристика импортного и отечественного станочного оборудования

Наименование станка	Габаритные размеры станка (длина × × ширина × высота), мм	Масса станка, кг	Установленная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Производительность, шт./ч, по представителю	Назначение	Размеры обрабатываемых кругов $D \times T \times H$, мм (максимальные)
Прецизионный плоскообдирочный фирмы "Джн энд Би"	4500 × 4000 × 4600	17700	40,0	$P_{ст} = 8–18$, $P_{изд} = 3–9$	8 (600 × 600 × 305)	Обработка торцов	1070 × 660 × 203–305
Плоскообдирочный модели К-12Z двухшпиндельный	4240 × 4500 × 4200	28800	28,0	$P_{ст} = 17$, $P_{изд} = 11–19$	8 (600 × 600 × 305)	То же	1060 × 250 × 203–305
Вертикально-шлифовальный фирмы "Джи энд Би"	7000 × 2500 × 4000	15000	22,0	$P_{шп} = 2500$, $P_{изд} = 250$	6 (600 × 600 × 305)	Обработка отверстий	900 × 600 × 305
Токарно-лобовой модели ОТ-10301	4160 × 3100 × 254	11000	21,5	$P_{шп} = 3000$, $P_{изд} = 160–320$	10 (600 × 600 × 305)	То же	1060 × 250 × 305
Вертикально-шлифовальный фирмы "Джи энд Би"	4200 × 3800 × 4500	18000	60	–	6 (600 × 600 × 305)	Обработка наружной поверхности	900 × 600 × 305
Вертикально-шлифовальный модели ХШ-156	2500 × 2350 × 2870	5900	13,2	$P_{шп} = 3000$, $P_{изд} = 190–980$	15 (600 × 200 × 305)	То же	600 × 350 × 305

Примечание. $P_{шп}$ — частота инструмента, $P_{ст}$ — стола, $P_{изд}$ — изделия.

По мнению зарубежных фирм, безопасность эксплуатации кругов является важнейшим показателем, в связи с чем готовый инструмент подвергается жесткому контролю на прочность. Прочностным испытаниям подвергаются (за редким исключением) 100 % кругов диаметром 150 мм и более.

Отличительной особенностью испытательных установок зарубежных фирм (тестеров скорости) является вертикальная компоновка шпиндельных узлов повышенной жесткости, что достигается применением прецизионных подшипниковых узлов с передачей крутящего момента шпинделю на участке между опорами. Основные органы установок утапливаются в шахту. В качестве приводов используются гидродвигатели необходимой мощности.

Повышение жесткости шпиндельных узлов и плавность их разгона при применении гидромоторов являются положительным фактором при испытаниях хорошо отбалансированных шлифовальных кругов. При наличии дисбаланса центробежные силы от неуравновешенности шлифовальных кругов передаются на подшипниковые опоры жестких шпиндельных узлов непосредственно, и так как возрастают в квадратной зависимости от частоты вращения, то являются мощным источником динамических нагрузок на опоры.

Следует отметить, что скоростные испытательные установки (тестеры скорости), по мнению зарубежных фирм, должны проходить тарированные проверки через определенное время — один раз в 3 мес, но не реже одного раза в год. Допустимые отклонения не должны превышать 0—5 % для установок производственного назначения.

Фирмой “Джи энд Би” рекламируется 900-миллиметровая скоростная испытательная установка, специально предназначенная для испытания скоростных шлифовальных кругов больших размеров и высот, со следующей технической характеристикой:

максимальный диаметр круга — 900 мм;

максимальная высота круга — 600 мм;

максимальная масса круга — 350 кг;

диапазон размера посадочных отверстий — 51—305 мм;

управляемый диапазон частот вращения — от 0 до 6000 об/мин;

масса испытательной установки с блоками питания и электрической частью — 9200 кг;

производительность (на кругах 600 × 600 × 305) — 12 шт./ч.

Методы измерения твердости по рекомендациям зарубежных фирм включают следующие испытания:

испытание ударом;

испытание по методу Роквелла;

пескоструйное испытание;

акустическое испытание;

контроль плотности.

По мнению отдельных фирм, испытание ударом является лучшим методом для определения твердости шлифовальных кругов, так как имитирует свойства самозатачивания шлифкруга при эксплуатации. Другое преимущество системы испытания ударом зарубежные специалисты видят в ее логической взаимосвязи с системой буквенных степеней твердости, включающих 18 букв от С до Т и разделенных на 17 равных степеней по геометрической прогрессии

с показателем глубины проникновения при испытании ударом удваивается через каждые пять степеней шагов (т. е. 1,15).

Кроме того, сила удара, используемая при измерении буквенных степеней от С до У должна удваиваться при измерении степеней с К до Т, что достигается удвоением высоты падения ударного инструмента. Система имеет и свои недостатки, связанные с отсутствием стандартных испытательных машин и научно обоснованной методики измерения.

Канадские фирмы, используя ударный метод, изготавливают собственные испытательные машины и продают их потребителям.

В отечественной практике метод испытания кругов на удар не используется в связи с отсутствием испытательных машин такого класса.

Метод Роквелла зарубежные фирмы применяют к инструменту с зернистостью до 150, при этом инструмент не должен быть тверже Р. Метод Роквелла используют также для контроля хонинговальных брусков зернистостью 150 и мельче.

Испытания на твердость пескоструйным методом зарубежными фирмами не применяются. Это обусловлено главным образом тем, что для системы буквенных степеней твердости результаты пескоструйных испытаний не совпадают с результатами ударных испытаний. По мнению зарубежных фирм, пескоструйные испытания дают хорошие результаты при проверке неоднородности кругов.

Акустический метод, по мнению зарубежных фирм, является наилучшим сравнительным методом контроля, обеспечивающим оценку модуля упругости Е и отличающимся точностью, чувствительностью и оперативностью измерений.

Отрицательной стороной этого метода является невозможность определения неоднородности инструмента. Однако считается, что если результаты акустических испытаний больших партий кругов укладываются в пределы некоторого допуска, то это свидетельствует (с определенной вероятностью) о стабильности технологического процесса.

Приборы Grindo Sonic (Бельгия) и “Звук” (Россия), используемые при акустическом испытании, работают на принципе ударного возбуждения колебаний в изделии с последующим измерением частоты колебаний.

В приборах “Звук” регистрируется строго определенная форма колебаний. Разработанный в США компанией “Сатурн” прибор для акустических испытаний работает по принципу возбуждения колебаний в изделии от генератора и плавного изменения частоты колебаний генератора от момента наступления резонанса. Результаты измерений приборами Grindo Sonic, “Звук” и “Сатурн” дают однозначные выводы. Однако, по мнению фирмы “Сатурн”, приборы “Звук” и Grindo Sonic являются более простыми и надежными и поэтому пригодны для практического использования.

Фирмой “Джи энд Би” для определения модуля упругости шлифовальных кругов используется исключительно прибор Grindo Sonic. Встроенный в него компьютер устанавливает соотношение между размерами круга и частотой колебаний и вычисляет модуль упругости.

Дисбаланс в шлифовальных кругах определяется главным образом неоднородным распределением материала, а также погрешностями геометрической формы круга.

Неуравновешенность шлифовальных кругов является источником многих проблем при эксплуатации инструмента, так как вызывает интенсивную вибрацию шлифовального оборудования, износ опор шпиндельных узлов, прижоги и волнообразования на обработанной поверхности деталей, снижает стойкость шлифовальных кругов, уменьшает предельные частоты вращения и прочностные свойства работающего инструмента.

Для проверки неуравновешенности зарубежные фирмы используют балансировочное оборудование трех типов:

для статической балансировки в статическом режиме (параллели, диски и др.);

для статической балансировки в динамическом режиме;

для динамической балансировки (коррекция в двух плоскостях), работающие в динамическом режиме.

Эти три типа устройств служат трем различным целям.

Оборудование для статической балансировки в статическом режиме, аналогом которого в России являются балансировочные параллели, как правило, оснащено электронными системами для определения значения и положения неуравновешенной массы. На отечественных параллелях такие системы отсутствуют.

Статическое балансировочное оборудование имеет встроенные микропроцессоры, осуществляющие автоматическое определение корректирующей массы и места ее добавления для уравновешенности. Место расположения неуравновешенной массы воспроизводится на круговом дисплее, разбитом на 60 секторов.

Оборудование этого типа имеет регулируемые пределы чувствительности, перенастраиваемые в зависимости от массы кругов с предельным значением 400 кг. Производительность оборудования — до 12 шт./мин.

Балансировочное оборудование с динамическим режимом работы подразделяется:

на оборудование для определения статической неуравновешенности шлифовальных кругов (в одной плоскости);

на оборудование для определения динамической неуравновешенности шлифовальных кругов (в двух плоскостях).

Большая часть используемого в настоящее время балансировочного оборудования фирмы "Джи энд Би" измеряет статическую неуравновешенность.

Оборудование для статической балансировки содержит вращающийся шпиндель прецизионного исполнения, расположенный вертикально или горизонтально. Чаще используется вертикальная компоновка. Колебания шпинделя, вызванные неуравновешенными массами, регистрируются датчиком и передаются в электронно-измерительную систему с компьютерным устройством.

Высокие круги (Н/Д $\geq$ 0,5) подвергаются динамической балансировке, при которой неуравновешенные массы определяются в двух плоскостях и создают при вращении момент пары сил. Динамическое балансировочное оборудование фирмы позволяет измерять как динамический, так и статический дисбаланс шлифкругов.

Применительно к шлифовальным кругам в отечественной практике отсутствует балансировочное оборудование с динамическим режимом работы, за

исключением экспериментального станка модели СБИП-350 для совмещенного контроля статической неуравновешенности и испытания на механическую прочность невысоких шлифкругов диаметром 150–350 мм.

Балансировочное оборудование отечественного производства позволяет определять только статическую неуравновешенность и не предназначено для балансировки кругов большой высоты; оборудование очень несовершенно, малопроизводительно, с большой погрешностью определения дисбаланса.

Контроль плотности является, по мнению фирмы "Джи энд Би", одним из наиболее важных, так как отклонения при ударном измерении твердости являются следствием локальных изменений плотности. Так, при оценке абразивного круга степенью твердости K изменение плотности на 0,06 г/см^3 изменяет ударную степень на единицу твердости, а, например, добавка связки в количестве 1 % от общей массы также вызывает изменение степени твердости на единицу.

Таким образом, если допустима погрешность ±1 % на 10 единиц плотности для массы связки, то содержание связки должно быть взвешено с погрешностью ±1 % на 3 единицы изменения плотности, а плотность должна контролироваться с погрешностью 1 %, т. е. в пределах ±0,02 г/см^3. Хотя эта задача является весьма сложной, она должна решаться с применением безусадочной технологии изготовления кругов всех размеров и форм.

Для определения плотности кругов фирма "Джи энд Би" применяет гидростатическую систему измерений, в соответствии с которой изделие взвешивается, затем покрывается парафином и вновь взвешивается, далее изделие помещают в воду, и взвешивается масса вытесненной воды при условии полного погружения в воду. Плотность определяется делением массы изделия на массу вытесненной воды.

Большая часть парафина находится в порах. Если часть парафина находится вне пор, то это приводит к появлению ошибки, которая тем меньше, чем больше размер изделия. Однако этот метод непригоден для точного измерения плотности кругов небольшой высоты.